

Zpracování signálu z mikrovlnného koaxiálního rezonátoru

Signal processing from microwave
coaxial resonator

Ondřej Trochta

Diplomová práce
2005



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta Technologická

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. RNDr. Vojtěchu Křesálkovi, CSc. za odborné vedení, rady a připomínky, které mi při řešení mé práce poskytoval.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval/a samostatně a použitou literaturu jsem citoval/a.

Ve Zlíně, 13. 06. 2005

.....

jméno diplomanta

ABSTRAKT

Úkolem diplomové práce bylo naměřit a vyhodnotit data z koaxiálního mikrovlnného rezonátoru, jež byla měřena spektrálním analyzátozem FSH3 od firmy Rohde&Schwarz. Pro vyhodnocení naměřených dat byly v rámci diplomové práce vytvořeny programy v programovém prostředí MATLAB:

FSH3m – Program pro zpracování naměřených rezonančních průběhů z přístroje FSH3

Graf3D – Zobrazení ve dvojrozměrném nebo trojrozměrném prostoru zpracovaných dat z programu FSH3m

Pro ověření funkčnosti výše uvedených programů bylo provedeno několik zkušebních měření a následné vyhodnocení dat.

ABSTRAKT

The aim of this diploma project was to suggest and handle data gathered out of the measurements done by the coaxial microwave resonator. The data were measured on the FSH3 Rohde & Schwarz device. The data gathered were evaluated with the use of the following MATLAB computer programmes, that were created in terms of this diploma project:

FSH3M – programme for processing tune course done through FSH3

Graf 3D - two or three – dimensional display of the processed data out of FSH3M

To verify the functionality of the introduced programmes, several experimental measurements were taken followed by data evaluation.

OBSAH

ÚVOD	5
1 TEORETICKÁ ČÁST	7
1.1 PŘEHLED MIKROSKOPŮ A NÁHLED DO HISTORIE	7
1.1.1 Optický mikroskop	7
1.1.2 Elektronový mikroskop	7
1.1.3 Řádkovací tunelový mikroskop	7
1.1.4 Mikroskop atomárních sil	10
1.1.5 Mikrovlnný mikroskop	13
1.2 RLC OBVODY	14
1.2.1 Obvod RLC sériový	15
1.2.2 Sériová rezonance	17
1.2.3 RL obvod paralelní	18
1.2.4 Paralelní rezonance	20
1.2.5 Zpracování faktoru kvality z naměřených dat	21
1.3 PŘÍSTROJE POUŽITÉ K MĚŘENÍ	22
1.3.1 Signálový generátor SM300	23
1.3.2 Analyzátor R&S FS300	26
1.3.3 R&S FSH3	29
2 PRAKTICKÁ ČÁST	33
2.1 POUŽITÉ PŘÍSTROJE K MĚŘENÍ	33
2.2 STRUČNÝ ÚVOD DO VYHODNOCOVÁNÍ DAT	33
2.2.1 Převod souboru na rastr	34
2.3 JAK PRACOVAT S PROGRAMEM FSH3M	35
2.4 PROGRAM FSH3M Z PROGRAMOVÉHO HLEDISKA	40
2.4.1 Stručný vývojový diagram programu „FSH3m“	40
2.4.2 Stručný popis vývojového diagramu programu „FSH3m“	41
2.5 JAK PRACOVAT S PROGRAMEM GRAF3D	43
2.6 PROGRAM GRAF3D Z PROGRAMOVÉHO HLEDISKA	47
2.6.1 Stručný vývojový diagram programu Graf3D	47
2.6.2 Graf3D po programové stránce	48
2.7 HARDWAROVÉ POŽADAVKY	49
3 MĚŘENÍ	50
3.1 SNÍMANÝ VZOREK ČÁSTI ČÍSLA „5“	51
3.2 DRUHÝ SNÍMANÝ VZOREK „K“, VYHODNOCENÍ POMOCÍ MAXIMA FREKVENCE	53
3.3 VYHODNOCENÍ „K“ POMOCÍ FAKTORU KVALITY Q	56
3.4 MĚŘENÍ ČÍSLA „4“ NA LETOPOČTU MINCE	58
3.5 SNÍMANÉ „K“ S RASTREM 31X31	60
3.6 IMPORT VYHODNOCENÝCH DAT DO PROGRAMU MICROSOFT EXCEL	62
3.7 ZJIŠTĚNÍ CITLIVOSTI MIKROSKOPU	63
ZÁVĚR	66
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	70
SEZNAM OBRÁZKŮ	72
PŘÍLOHA	74

ÚVOD

Se vzrůstajícím rozvojem bezkontaktní a nedestruktivní zobrazovací techniky vzrůstá i četnost jejího využití. Jedná se zejména o využití v oblasti elektro-optické komunikaci, informačním průmyslu, při studování defektů vodičů, polovodičů či supravodičů, při studování tenkých magnetických filmů v magnetickém poli, aj.

Pro tyto účely byly vyvinuty následující techniky, které jsou podrobněji popsány v první kapitole teoretické části mé diplomové práce. Popisují zde základní typy mikroskopů jako např. STM (Scanning Tunnelling Microscope), AFM (Atomic Force Microscope), NSMM (Near-field Scanning Microwave Microscope) a poskytují tím tak krátký náhled do historie těchto přístrojů.

NSMM (Near-field Scanning Microwave Microscope), tedy mikrovlnný koaxiální rezonátor, je nejnázematelem nahraditelný RLC obvodem. Právě další kapitola je věnována problematice RLC obvodu s podkapitolou jevu rezonance, která je hlavním faktorem při vyhodnocení povrchu, jež je skenovaný mikrovlnným koaxiálním rezonátorem. Při vyhodnocování dat jsou sledovány změny rezonanční křivky jejichž změny se projeví na struktuře vykreslení povrchu.

Poslední kapitolou teoretické části mé diplomové práce je kapitola, v níž se zabývám technickými přístroji, které se podílejí na měření rezonanční křivky mikrovlnného koaxiálního rezonátoru. Zejména se zaměřuji na stručný popis těchto přístrojů: Signálový generátor SM300, Analyzátor R&S FS300, R&S FSH3 od Německé firmy Rohde&Schwarz. Teoretická část se stala jedním z východisek při zpracování rezonanční křivky.

Téma principu koaxiálního rezonátoru je rozsáhlé, proto se tímto tématem zabývám společně se svým kolegou Bc. Romanem Heinzem. Kolega se zabývá sestavením mikrovlnného koaxiálního rezonátoru. Stěžejním bodem praktické části mé diplomové práce bylo navrhnout programy pro vyhodnocení dat z mikrovlnného koaxiálního rezonátoru. Za data se považují změny rezonančních křivek. Cílem programů je vyhodnotit maxima frekvence a faktor kvality z naměřených rezonančních křivek, jež jsou měřeny již výše zmiňovanými přístroji. Vytvořené programy se zaměřují na struktury ukládaných dat, které bylo nutno načíst a vyhodnotit. Pro tyto účely právě slouží program „FSH3m“, jenž vyhodnocuje rezonanční křivky s naměřených souborů a vyhodnocená data „faktor kvality a maxima frekvence“, která jsou ukládána do souboru k dalšímu zpracování. Zpracovaná

uložená data slouží pro program „Graf 3D“, který dává těmto datům vizuální podobu. Data zobrazují skenovaný povrch měřeného vzorku.

Z počátku byly měřeny velké objekty s malým rastrem, postupně se měřily menší objekty se stejným rastrem, poté o něco menší objekty s ještě menším rastrem. Pro ověření funkčnosti programu byly naměřeny části mince. Celkem byly naměřeny čtyři vzorky. Nejprve byla skenována část číslice pět, jež měla největší možný rastr s největší možnou skenovanou plochou 5x5 mm, s rastrem 20x20 bodů. Jako druhý vzorek bylo naměřeno písmeno „K“ opět s rastrem 20x20 bodů, ale o velikosti 3x3 mm. Největší rastr 40x40 bodů byl měřen u třetího měření, kde se měřila číslice z letopočtu mince “4”. Při posledním měření jsme opět zvolili písmeno “K” s větším rastrem 30x30 bodů o stejné velikosti 3x3 mm jako u předchozích měření u písmena “K”. Jednotlivé výsledky jsou blíže popsány v praktické části diplomové práce.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Přehled mikroskopů a náhled do historie

Mikroskopie popisuje dvě základní metody pozorování. Do přímých metod pozorování řadíme optické a elektronové mikroskopy. Do metod nepřímých řadíme například řádkovací tunelový mikroskop (STM - Scanning Tunnelling Microscope), mikroskop atomárních sil (AFM - Atomic Force Microscope) a mikrovlnný mikroskop (NSMM – Near-field Scanning Microwave Microscope).

1.1.1 Optický mikroskop

Toto zařízení slouží ke sledování drobných předmětů v optickém oboru za pomoci soustavy čoček. Tento typ mikroskopu byl vynalezen v roce 1590 H. Janssenem a jeho synem Z. Janssenem v Holandsku [1].

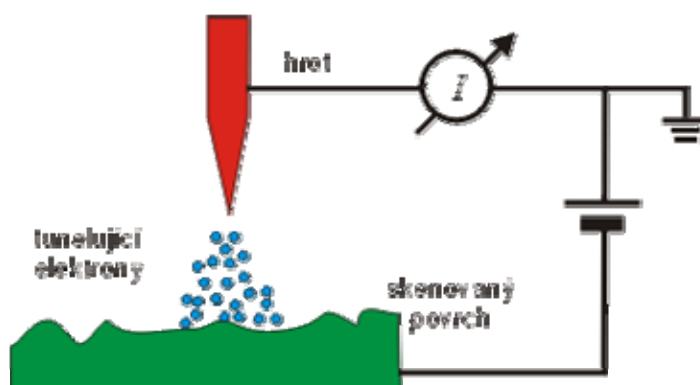
1.1.2 Elektronový mikroskop

Elektronový mikroskop byl vynalezen v roce 1931 Ernem Ruskem, který v roce 1986 obdržel Nobelovu cenu za konstrukci elektronového mikroskopu. Tento typ mikroskopu, využívá k zobrazení předmětů vlnových vlastností elektronu. Elektrony použité namísto světla mají kratší vlnovou délku než fotony. To má za následek větší rozlišovací schopnost. Zatímco optické mikroskopy mají rozlišení kolem 0.2 μm , elektronový mikroskop může mít rozlišení až 0.1 nm. Existují dva typy elektronového mikroskopu: v TEM mikroskopu (Transmission Electron Microscope) elektrony prochází vzorkem, v SEM mikroskopu (Scanning Electron Microscope) jsou detekovány sekundární elektrony emitované z povrchu materiálu. Výsledný snímek elektronového mikroskopu se nazývá elektronový mikrograf (EM - Electron Micrograph) [1].

1.1.3 Řádkovací tunelový mikroskop

STM (Scanning Tunnelling Microscope). Řádkovací tunelový mikroskop (Obr. 1) byl vyvinut v IBM v Zurichu Gerdem Binnigem a Heinrichem Rohrerem v roce 1981. Za tento objev, oba výše jmenovaní, získali Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1986 spolu s objevitelem elektronového mikroskopu Ernem Ruskem [1]. Konstrukce řádkovacího tunelového mikroskopu byla významným pokrokem při zobrazování objektů mikrosvětla,

ve kterém má široké uplatnění. STM se stal nepostradatelným pro mnohé vědní obory, zejména pro chemii, biologii a pro studium pevných látek. STM umožňuje nejen zobrazovat povrch materiálu, ale i měřit jeho vlastnosti na atomární úrovni a manipulovat s jednotlivými atomy. To vše navíc v různých prostředích - vzduch, speciální atmosféra, kapalina, vakuum, nízké i vysoké teploty (řádově ve stovkách stupňů Celsia) [4]. Základním prvkem zařízení je jehla s extrémně ostrým hrotem, jež se může pohybovat v postupných řádcích ve velmi těsné vzdálenosti [5].



Obr. 1. Princip řádkovacího tunelového mikroskopu [1]



Obr. 2. Skenovací hrot řádkovacího tunelového mikroskopu [4]

Počet elektronů procházející mezi vzorkem a hrotem je dán kvantovým tunelovým jevem. Principy tunelového jevu popisuje kvantová fyzika. K tunelovému jevu dochází v případech, kdy částice nemá dostatečnou energii na proniknutí energetickou bariérou a tedy by měla dle klasické fyziky zůstat uvnitř ohraničené oblasti. V oblasti kvantové fyziky, kde je částice popisována vlnovou funkcí, tato funkce v oblasti bariéry pouze exponenciálně klesá a v případě dostatečně tenké bariéry je i po průchodu bariérou nenulová. Vzhledem k tomu, že pravděpodobnost výskytu částice v daném místě je dána

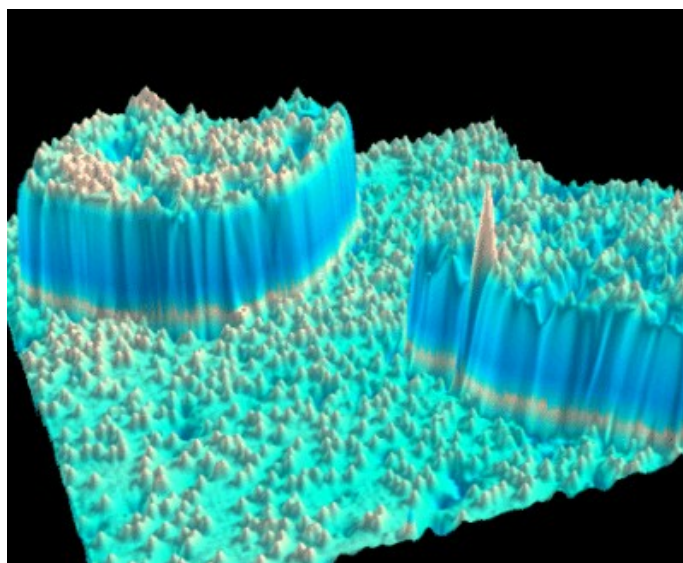
kvadrátem velikosti vlnové funkce v daném bodě, existuje nenulová pravděpodobnost proniknutí částice skrz bariéru. Tato pravděpodobnost je ovšem velmi malá a přibližně se dá vyjádřit vztahem:

$$P \sim e^{-\frac{2}{\hbar}\sqrt{2m(V-E)}} \quad (1)$$

Zde je $\hbar$ Planckova konstanta ($6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s), m hmotnost elektronu, E energie částice, V výška energetické bariéry a d její šířka. Je vidět, že s narůstající šířkou prudce (exponenciálně) klesá pravděpodobnost přechodu a právě tato vlastnost je základem tunelové mikroskopie. [6]

Drobné nerovnosti povrchu mají za následek enormní nárůst proudu v elektrickém obvodu. Signál je počítačově zpracován do výsledného obrázku povrchu materiálu. STM metoda je přímo založena na pravděpodobnosti průchodu částice energetickou bariérou. Energetická bariéra je vytvářena prostorem, v němž dochází k částečnému překrytí vlnových funkcí atomů hrotu a povrchu. Elektrony v kovu mají menší energii než elektrony ve vakuu mezi nimi, čímž se vytvoří bariéra. Jsou-li oba kovy shodné, je bariéra naprosto symetrická, oběma směry přecházejí elektrony a celkový proud je nulový. Přiložíme-li napětí, symetrie zmizí a celkový proud bude nenulový. Velikost proudu je ovlivňována i přítomností prázdných hladin v jednom kovu a obsazených v druhém (tj. tvarem vlnových funkcí). Vlastní měření probíhá tak, že nejprve se provede hrubý posuv vzorku k hrotu ve směru z (hrot je zde tvořen zaostřeným drátkem, např. wolframovým), tento posuv může být čistě mechanický. Poté dojde k přiložení napětí mezi hrot a vzorek, aby mohl procházet proud (je tedy zapotřebí vodivý vzorek) a nyní se jemným posuvem (pomocí piezokeramiky) přiblíží vzorek ke hrotu tak, aby procházející proud nabyl měřitelných hodnot, pak se přibližování zastaví. Získání obrazu (skenování) se provádí skokovým posuvem ve dvou rozměrech (x , y) po příslušné matici měřicích bodů, zpravidla se pohybuje po řádcích a v jednom směru (zpětný pohyb je tedy prázdný). Výstupem měření je matice a_{ij} , jejíž indexy označují polohu bodu a příslušná hodnota je velikost měřeného signálu. Tento signál může být dvojího druhu, v závislosti na režimu měření: režim s konstantní výškou, režim s konstantním proudem. U režimu s konstantní výškou se udržuje již jednou nastavená hodnota z_0 a měří se velikost tunelového proudu. Tento režim umožňuje rychlé snímání obrazu, protože není nutno pohybovat vzorkem, ale je méně přesný, neboť při velkých vzdálenostech hrotu od povrchu se proud dostává

pod měřitelnou úroveň. Režim s konstantním proudem, při němž se pomocí zpětné vazby udržuje konstantní úroveň proudu. Měronosnou veličinou je napětí přikládané k piezokeramickým pohybovým prvkům. Tento režim je pomalejší, umožňuje sledovat větší změny profilu povrchu, je však závislý na převodním vztahu přiloženého napětí a změně rozměru piezopravku. První přístroj z této kategorie začal pracovat roku 1972, když R. Young sestrojil svůj Topografiner. Zařízení bylo schopné mapování povrchu ve vzdálenosti 100 nm. Atomárního rozlišení však zde nebylo dosaženo z důvodu značné nestability vzdálenosti hrotu od povrchu. Nevýhodou STM metody je, že neposkytuje okamžitý a vizuální obraz. Snímání je postupné a je nutno pro zobrazení využít počítače. Další nevýhodou může být poškození povrchu. Přejde-li hrot nad oblast s výrazně odlišnými elektrickými vlastnostmi (např. zoxidovaná místa), dojde k velkému snížení hrotu. Od tohoto mikroskopu byla odvozena celá řada příbuzných technik, využívajících různých interakcí s povrchem. Souhrnně se označují jako rastrovací sondové mikroskopie [6].



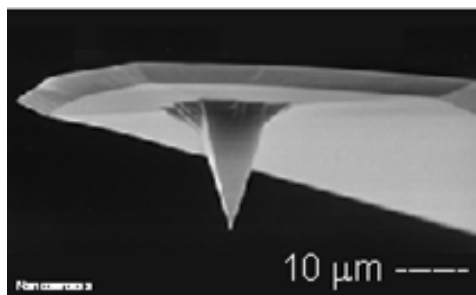
Obr. 3. Povrch železa s nečistotami chrómu (dvě vyvýšeniny). NASA 2004 [1]

1.1.4 Mikroskop atomárních sil

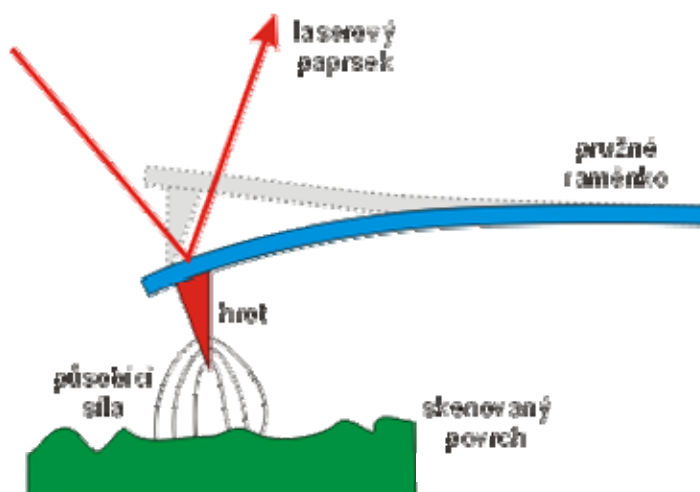
AFM (Atomic Force Microscope). Další pokrok v mikroskopii byl dosažen v roce 1986. Gerd Binnig a Cal Quate ze Stanfordské university spolu s Christopherem Gerberem z IBM zkonstruovali nový typ mikroskopu. AFM mikroskop skenuje povrch materiálu pomocí hrotu zavěšeného na pružném výkyvném raménku. „Síly ohýbající nosník mohou

být různé fyzikální podstaty, především se však uplatňuje přitažlivá van der Waalsova síla působící mezi dvěma atomy na větší vzdálenosti a odpudivá síla plynoucí z Pauliho principu, která působí na menších vzdálenostech“. Celková síla může být jak odpudivá, tak i přitažlivá v závislosti na vzdálenosti hrotu. Tyto síly jsou mapovány těsným přiblížením hrotu k povrchu, čímž vzniká přitažlivá nebo odpudivá síla, způsobující ohnutí nosníku, na němž je upevněn hrot. Toto ohnutí je snímáno laserovým snímačem, který vytváří měronosnou veličinu [1].

Tato metoda má širší použití než STM mikroskop, AFM mikroskop není omezen pouze na vodivé materiály [1]. Mezi nevýhody AFM mikroskopu řadíme malý rozměr skenovaných vzorků, jen $100\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m}$.



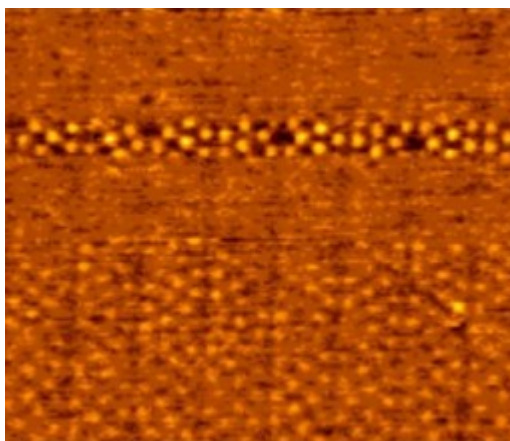
Obr. 4. Snímací hrot AFM mikroskopu [4]



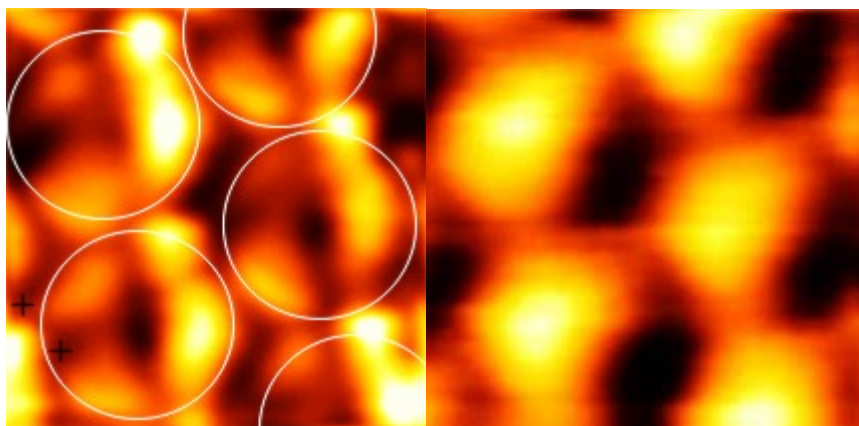
Obr. 5. Princip AFM mikroskopu [1]

„V roce 1994 byla zkonstruována nová varianta tohoto mikroskopu - FM-AFM mikroskop (Frequency Modulated AFM). Pružné raménko je rozkmitáno harmonickou

silou na vlastní frekvenci raménka a jeho vyšších harmonických frekvencích. Měření je fázový posuv kmitání způsobený atomárními silami. Právě touto technologií bylo v roce 2004 dosaženo zatím největšího rozlišení: 77 pikometrů (77×10^{-12} m). V tomto rozlišení je již možné rozeznat struktury uvnitř jednotlivých atomů. Experiment provedli Jochen Mannhart, Thilo Kopp a Franz J. Giessibl na německé universitě v Augsburgu. Mikroskopie se tak dostala poprvé na hranici pikometrové oblasti“ [2].



Obr. 6. První AFM snímek povrchu křemíku s rozlišením na atomární úrovni. Velikost oblasti $18 \times 18 \text{ nm}^2$. Barvy označují výšku nad povrchem. Nahoře je patrná řádka atomů. Science 267, 68 (1995) [1]



Obr. 7. FM-AFM snímek s rozlišením 77 pm. Viditelné jsou struktury uvnitř atomů wolframu. Celá oblast zaujímá plochu $500 \times 500 \text{ pm}^2$. Napravo je pro srovnání tatáž oblast skenovaná mikroskopem STM [3]

1.1.5 Mikrovlnný mikroskop

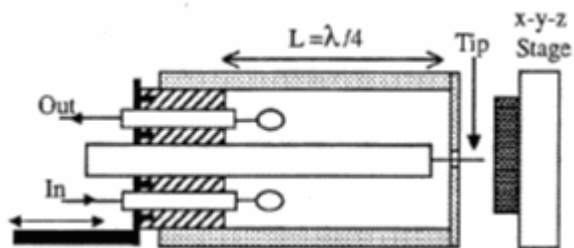
NSMM (Near-field Scanning Microwave Microscope). Oproti mikroskopu atomárních sil (Atomic force microscopy), kde je pro přenos informací využíváno atomových interakcí, používá mikrovlnný mikroskop (Near-field Scanning Microwave Microscope) jako média mikrovlny. NSMM používá vln „near-field“, jejichž existence je v blízkosti hrotu, k zobrazení vzorku. Mikrovlnný mikroskop je schopný rozlišení 1 μm nebo ještě méně, což záleží na rozlišovací schopnosti, která je dána vzdáleností skenovacího bodu k následujícímu bodu, tj. rozlišovací schopnost posuvu. Rozlišovací schopnost povrchu je také ovlivněna ostroží jehly, jež by měla mít špičku hrotu o velikosti atomu. Podmínkou lepší kvality snímané rezonanční křivky je dobré postříbření vnitřního povrchu rezonátoru.

Mikrovlnný mikroskop NSMM od doby svého vzniku svoji podobu výrazně nezměnil. Přesto došlo k četným změnám, jež vedly ke zpřesnění výsledků a tím ke zlepšení kvality snímání. Posledním publikovaným typem přístroje NSMM je $\lambda/4$ koaxiální rezonátor s ladící dutinou [7].

$\lambda/4$ KOAXIÁLNÍ REZONÁTOR

Všechny typy $\lambda/4$ koaxiálních rezonátorů využívají dvou 50 Ω koaxiálních kabelů, vstupujících do rezonátoru. Na konci obou kabelů jsou vazební smyčky. Jedna smyčka na kabelu vycházející z generátoru signálu budí uvnitř rezonátoru magnetické pole. Druhá smyčka magnetické pole přijímá a vede do spektrálního analyzátoru. Poté jsou sledovány změny signálu.

Námi zvolený $\lambda/4$ koaxiální rezonátor byl sestaven dle návrhu konstrukce vědců ze Sogang Univerzity v Soulu a to především Jooyoung Kim, Myung Sik Kim, Kiejin Lee, Jaekwang Lee, Deokjoon Cha a Barry Friedman [7]. Námi sestavený rezonátor má následující podobu (viz. Obr. 1). Podrobnější informace o sestaveném koaxiálním mikrovlnném rezonátoru naleznete v diplomové práci [17].

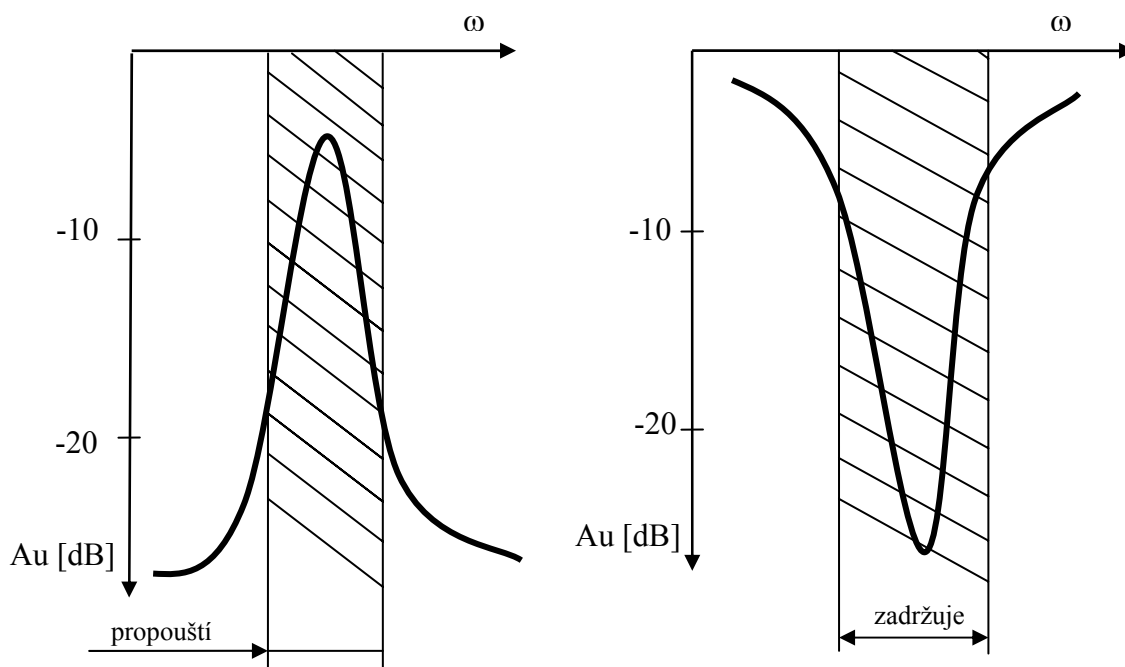


Obr. 8. Rezonátor sestavený podle [7]

Vodič, který přenáší mikrovlny, se vodorovně na vodič vytváří pole elektrické a kolmo na něj se vytváří pole magnetické. Dochází tak ke vzniku elektromagnetického pole [9].

1.2 RLC obvody

Mikrovlnný koaxiální rezonátor je nejnázemněji nahraditelný RLC obvodem. Charakteristickou vlastností RLC obvodů je schopnost propouštět nebo potlačovat signály určitého pásma kmitočtu. Tato vlastnost je umožněna jevem zvaným rezonance. Pásmová propust nebo zadrž – Obr. 9 [10].



Obr. 9. Pásmová zadrž nebo propustnost

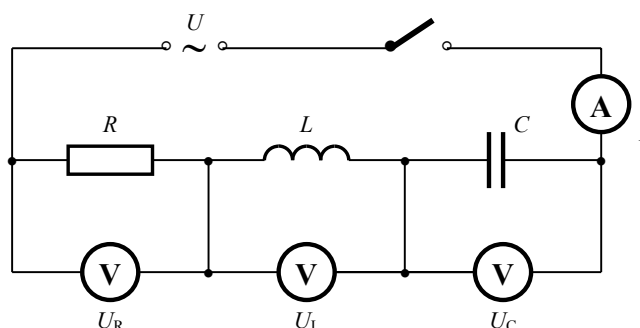
Rezonance je jev, který vzniká ve střídavých obvodech RLC. Jednotlivé prvky v obvodech se liší vlastnostmi, jakými se v obvodu projevují. Prvky obvodů střídavého proudu jsou elektrický odpor R , indukčnost L a kapacita C . Řešení obvodů střídavého proudu spočívá nejčastěji v určení efektivních hodnot proudů, které protékají jednotlivými větvemi daného zapojení [10].

Nejzákladnějším zapojením RLC obvodu je RLC obvod sériový (Obr. 10) a RLC obvod paralelní (Obr. 13).

1.2.1 Obvod RLC sériový

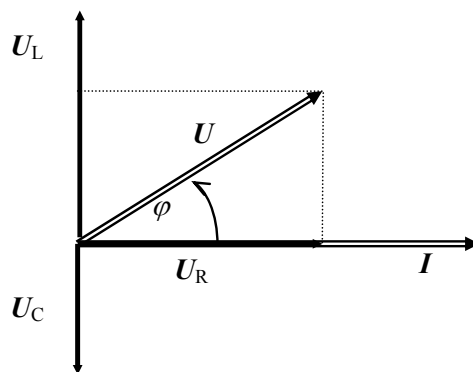
Na jednotlivých prvcích vznikají, při průchodu střídavého proudu obvodem jejich napětí, která mají různou velikost a jsou navzájem fázově posunuta:

- Na odporu R je napětí U_R ve fázi s proudem I
- Na indukčnosti L se napětí U_L se předbíhá fázově o $\pi/2$ rad před proudem I
- Na kapacitě C se napětí U_C se zpožďuje o hodnotu $\pi/2$ rad za proudem I .



Obr. 10. Sériový RLC obvod střídavého proudu

Celkové napětí získáme složením jednotlivých napětí na odporu, indukčnosti a kapacitě. Jednoduchým postupem pak získáme celkovou impedanci a výsledný fázový posun φ . Vztahy v tomto obvodu mezi veličinami v obvodu charakterizuje fázorový diagram efektivních hodnot napětí a proudu (viz obr. 2).

Obr. 11. Fázorový diagram sériového RLC obvodu střídavého proudu

Z fázorového diagramu vyplývá, že platí následující vztah.

$$U = U_R + U_L + U_C \quad (2)$$

Pro velikost výsledného napětí pak platí:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} \quad (3)$$

Pro velikost celkové impedanci Z sériového zapojení RLC získáme výraz.

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad (4)$$

Při výpočtech zavádíme ještě reaktanci.

$$X = X_L - X_C \quad (5)$$

Reaktance - charakterizuje tu část obvodu, v níž se elektromagnetická energie nemění v teplo, ale jen v energii elektrickou nebo magnetické pole. V případě vzniku rezonance v sériovém obvodu hovoříme o rezonanci sériové, kterou popisuje následující kapitola, kdy platí $X_L = X_C$ a $Z = R$. Výsledná reaktance obvodu je tudíž při rezonanční frekvenci f_r nulová.

Prvky LC nám svými vlastnostmi ovlivňují obvod následovně:

- Indukčnost L v obvodu vyvolá fázové posunutí proudu a ovlivní amplitudu proudu – induktance.
- Kapacita C v obvodu způsobuje předbíhání proudu před napětím o $\pi/2$ – kapacitance.

Induktance a kapacitance mají vlastnosti elektrického odporu (jednotka ohm). Nejde však z fyzikálního hlediska o elektrický odpor (elektrická energie se v rezistoru o odporu R mění pouze na vnitřní energii – prochází-li proud cívkou nebo obvodem s kondenzátorem, nedochází k přeměně elektrické energie na vnitřní energii). Je-li $X_L = X_C$ (dosáhneme vhodnou volbou L, C a ω) pak nastává jev zvaný rezonance. Rezonance je takový stav v obvodě RLC kdy celkové napětí U s celkovým proudem I a zdroj dodává do obvodu jen činný výkon. Obvod se v takovém případě chová jen jako ryzí odpor. Napětí na indukčnosti a na kapacitě jsou v každém čase t stejně velká, ale mají vždy opačnou polaritu, a tudíž se anulují. Stejně velké jsou i efektivní hodnoty těchto dvou napětí [10].

1.2.2 Sériová rezonance

Při rezonanci je celková komplexní impedance obvodu reálná a účinník je roven jedné. RLC obvod má komplexní impedanci, která je vyjádřena rovnicí (6) z obrázku (Obr. 12).

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R + jX \quad (6)$$

Obvod je v rezonanci, jestliže $X=0$, tj.

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (7)$$

a tedy

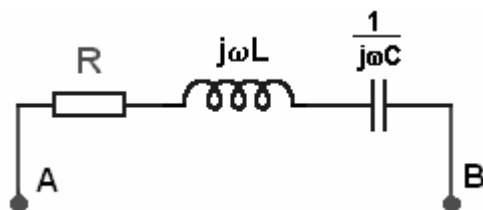
$$\omega = \omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \text{ (tzv. Thomsonův vztah)} \quad (8)$$

Jelikož je $\omega = 2\pi f$, je rezonanční frekvence dána vztahem.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (9)$$

Grafem této funkční závislosti je „rezonanční křivka“.

Odpor R však nikdy nezapojujeme zhoršili bychom jenom vlastnosti obvodu. Odpor R představuje vlastní ztráty obvodu. Jeho velikost bývá obvykle jednotky až desítky ohmů => sériový rezonanční obvod se prakticky chová v rezonanci jako zkrat.



Obr. 12. Sériové zapojení RLC

Důležitou veličinou rezonančního obvodu je činitel jakosti obvodu též nazývaný jako faktor kvality Q [11].

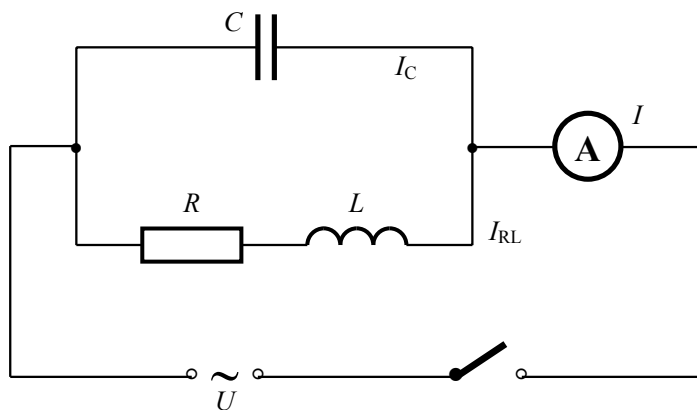
$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L_s}{C_s}} \quad (10)$$

1.2.3 RL obvod paralelní

Reálná cívka má kromě indukčnosti L vždy i určitý odpor R . Ve střídavých obvodech taková reálná cívka představuje sériovou kombinaci RL . Impedance pro cívku a odpor je pak dána vztahem:

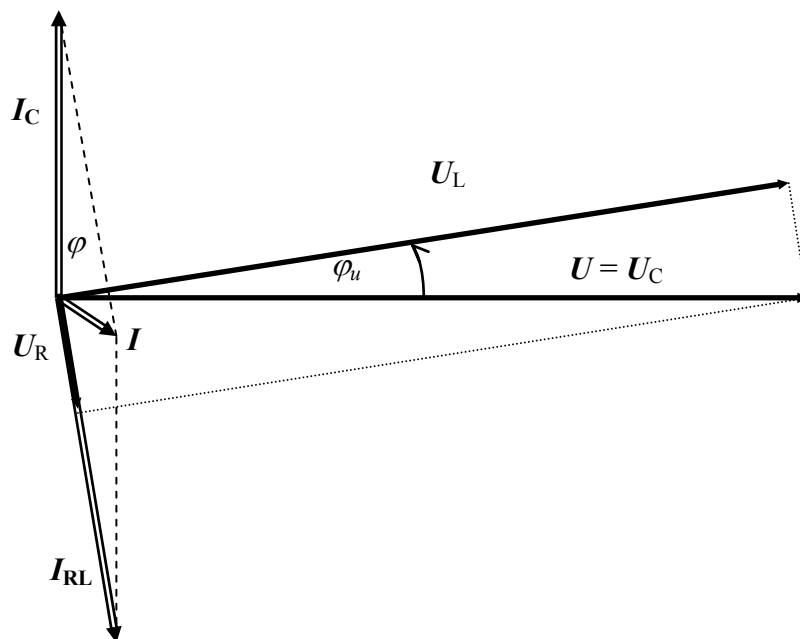
$$Z_{RL} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (11)$$

Tudíž uvedené zapojení už není čistě paralelním zapojením, ale kombinovaný střídavý obvod (Obr. 13).



Obr. 13. Paralelní zapojení v obvodu střídavého proudu

K řešení tohoto obvodu použijeme opět fázorového diagramu, který vystihuje jednotlivá fázová posunutí v obvodu – viz. (Obr. 14).



Obr. 14. Fázorový diagram pro paralelní zapojení kondenzátoru a cívky

Napětí na kondenzátoru i na cívce stejné a rovné napětí U zdroje. Ve kde je reálná cívka je toto napětí U rozděleno na napětí U_R a U_L , přičemž tato trojice ve fázovém diagramu splňuje Pythagorovu větu.

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} \quad (12)$$

Proud I_C tekoucí kapacitou předbíhá napětí U o $\pi/2$ rad a jelikož proud I_{RL} ve spodní větvi je ve fázi s napětím U_R , můžeme určit závislost mezi proudy v jednotlivých větvích a celkovým proudem I .

Jak je patrné z fázorového diagramu, tuto závislost vystihuje kosinová věta

$$I = \sqrt{I_C^2 + I_{LR}^2 - 2 \cdot I_C \cdot I_{LR} \cdot \cos \varphi} \quad (13)$$

kde

$$\cos \varphi = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad (14)$$

Z Ohmova zákona dostaneme po úpravě vztah pro celkový proud.

$$I = U \sqrt{(\omega C)^2 + \frac{1}{R^2 + (\omega L)^2} - \frac{2\omega^2 LC}{R^2 + (\omega L)^2}} \quad (15)$$

Kde výraz pod odmocninou představuje celkovou vodivost Y tohoto střídavého zapojení.

$$Y = \frac{1}{Z} \quad (16)$$

V případě vzniku rezonance u paralelního obvodu hovoříme o rezonanci paralelní, kdy se indukance obvodu rovná kapacitanci ($X_L = X_C$). Jev stejně jako u sériové rezonance nastává při určitých hodnotách L , C a ω . Podmínka pro rezonanční úhlovou frekvenci je stejná jako v obvodu sériovém.

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (17)$$

Rezonanční frekvence f_r je dána stejným vztahem jako v obvodu sériovém.

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (18)$$

Zdroj dodává do obvodu jen činný výkon, stejně jako u sériové rezonance. Paralelní obvod se chová jako pouhý odpor. Celkový proud I je ve fázi s napětím U a proudy ve větvích (I_{RL} , I_C) jsou v každém čase t stejně velké, ale mají vždy opačný směr. Jejich výsledná hodnota je tedy nulová [10].

1.2.4 Paralelní rezonance

Paralelní obvod s prvky R , L , C v jednotlivých větvích (Obr. 15), kde celková admitance je vyjádřena rovnicí [11]:

$$Y = G + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) = G + jB \quad (19)$$

Kde

$$B = B_C - B_L \quad (20)$$

$$B_C = \omega C \quad (21)$$

$$B_L = \frac{1}{\omega L} \quad (22)$$

Obvod je v rezonanci právě tehdy, když $B=0$, tedy

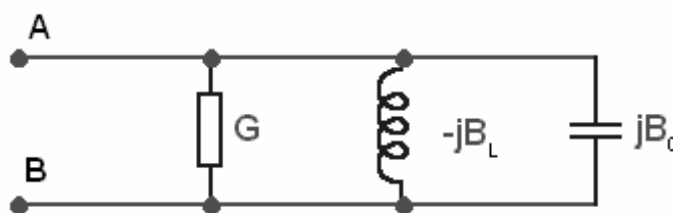
$$\omega C = \frac{1}{\omega L} \quad (23)$$

a

$$\omega = \omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (24)$$

Stejně jako u sériového RLC obvodu je rezonanční frekvence dána vztahem

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (25)$$



Obr. 15. Paralelní obvod s RLC prvky

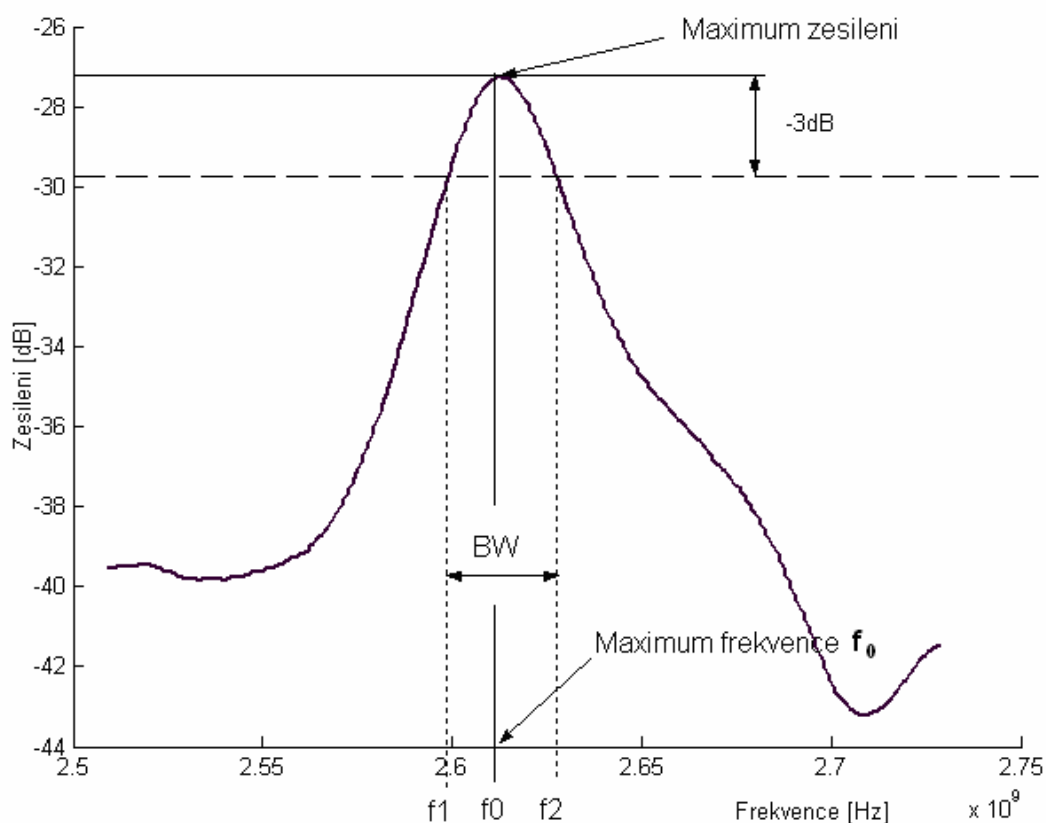
V paralelním rezonančním obvodu spočítáme činitel jakosti následovně:

$$Q = \frac{R_p}{\sqrt{\frac{L_p}{C_p}}} = \frac{f_r}{f_1 - f_2} = \frac{f_r}{\Delta f} \quad (26)$$

1.2.5 Zpracování faktoru kvality z naměřených dat

Po naměření rezonanční frekvence se faktor kvality spočítá následovně. Nalezneme maximum píku rezonanční frekvence. Naměřené maximum snížíme o 3dB. Tam, kde se protne rezonanční frekvence se sníženou přímkou odečteme na ose body odpovídající frekvencím f_1 a f_2 . Rozdíl mezi těmito dvěma body, měřené v hertzech, se nazývá šířka pásma BW (Obr. 16). Činitel jakosti (faktor kvality) je podíl maxima frekvence a šířky pásma [11].

$$Q_0 = \frac{f_r}{f_2 - f_1} = \frac{f_r}{BW} \quad (27)$$



Obr. 16. Průběh rezonanční frekvence námi použitým rezonátorem

Na faktor kvality má velký vliv dielektrikum mezi hrotem a snímaným vzorkem. Proto je citlivější na změny snímaného povrchu než maximum frekvence [9].

Oblasti mikrovln nad 1,5GHz se řeší obvody s rozprostřenými parametry, kde [12]:

$$Q = \frac{f}{df} \quad (28)$$

1.3 Přístroje použité k měření

Mikrovlnný mikroskop potřebuje signálový generátor, který generuje frekvenci. Frekvence prochází rezonátorem, jenž vytváří rezonanční křivku, která je snímána spektrálním analyzátozem. Pro vytvoření rezonanční křivky je potřeba, aby signálový generátor se spektrálním analyzátozem pracovali synchronizovaně. Pro měření mohou být použity tyto přístroje: signálový generátor SM 300 společně se spektrálním analyzátozem FS 300, FSH3.

1.3.1 Signálový generátor SM300

Úkolem signálového generátoru je vytvářet nemodulované a modulované signály v kmitočtovém rozsahu 9 kHz až 3 GHz. Je vhodný pro aplikace, kde je požadován signál o vysoké kvalitě. Interní nízkofrekvenční (LF) generátor je použitelný jako zdroj modulačního signálu a umožňuje generování analogových modulovaných signálů. Externí signál připojený ke vstupu I/Q umožňuje použití libovolných modulačních signálů, které jsou požadovány např. při provozu mobilních rádiových zařízení.

- Generování přesných zkušebních signálů pro laboratorní aplikace, servis nebo zajištění kvalitní výroby.
- Vytváření číslicově modulovaných signálů v kmitočtovém rozsahu 9 kHz až 3 GHz.
- Generování signálů a modulací (AM, impulsní) pro EMC zkoušky.
- Funkční zkoušky součástek při výrobě.

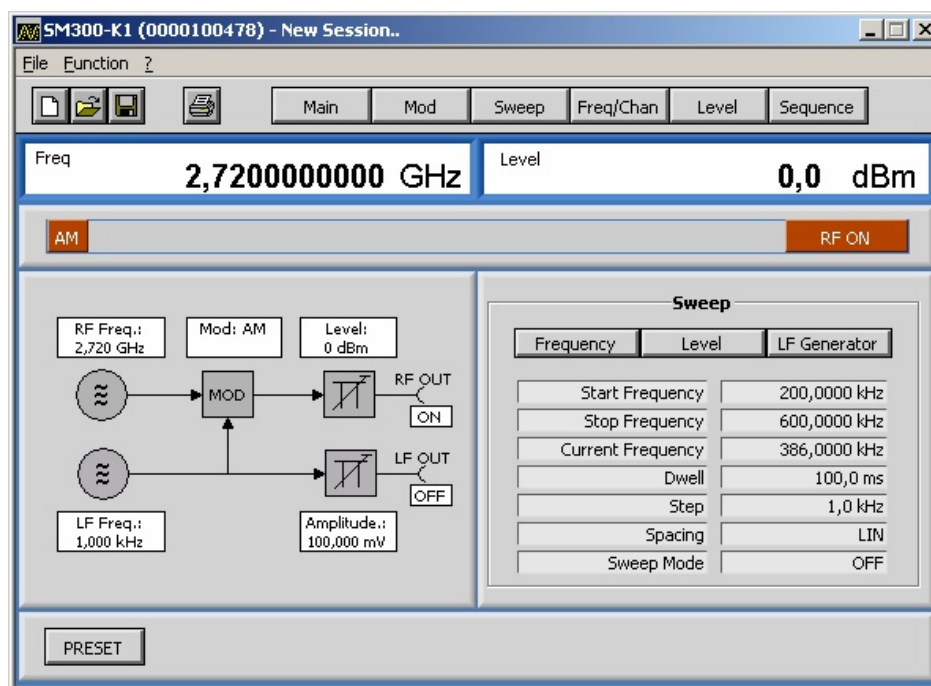
R&S SM300 má všechny potřebné parametry požadované pro aplikace, které vyžadují přesné nastavení úrovně a kmitočtu [13].

Specifikace zařízení:

- Vysoká kvalita signálu
- Interní analogové režimy modulace: AM/FM ApM
- Impulzní modulace
- I/Q modulátor, se vstupy pro externí číslicové modulační signály
- Rozmítání kmitočtu a úrovně
- Dálkové ovládání přes rozhraní USB

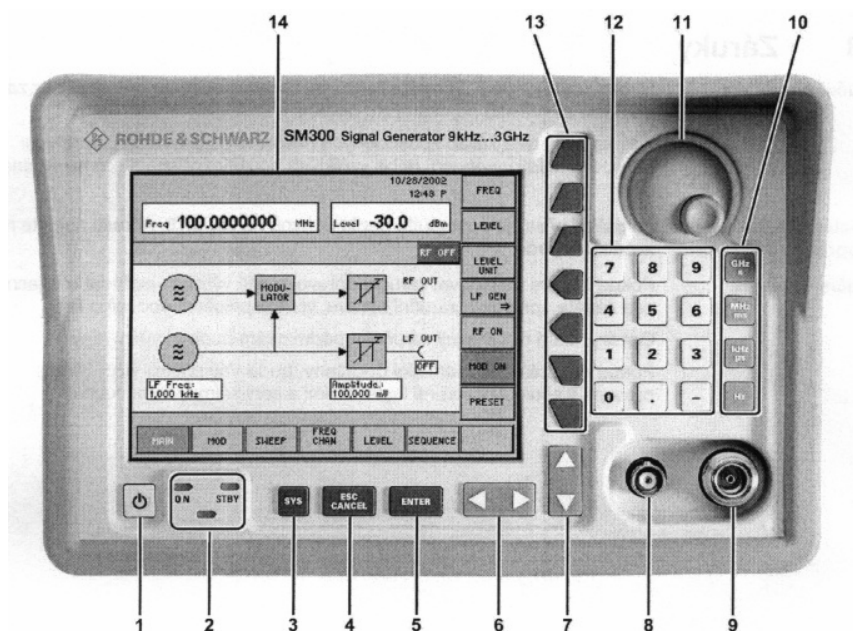
Všechny funkce a parametry nastavení je možno ovládat prostřednictvím nabídek, s využitím klávesnice a točítka. Aktuální nastavení a provozní stavy jsou přehledně uspořádány na barevném displeji TFT LCD. R&S SM300 je standardně vybavený rozhraním USB, prostřednictvím něhož může komunikovat s PC.

Za pomoci softwarového vybavení pro PC FS300-K1 můžeme ovládat všechny parametry a nastavení signálového generátoru (Obr. 17) pomocí počítače.



Obr. 17. Softwarové vybavení signálového generátoru SM300

Čelní pohled signálního generátoru je zobrazen na obrázku (Obr. 18).



Obr. 18. Čelní panel signálového generátoru SM300

Jednotlivé popisky k obrázku (Obr. 18.)

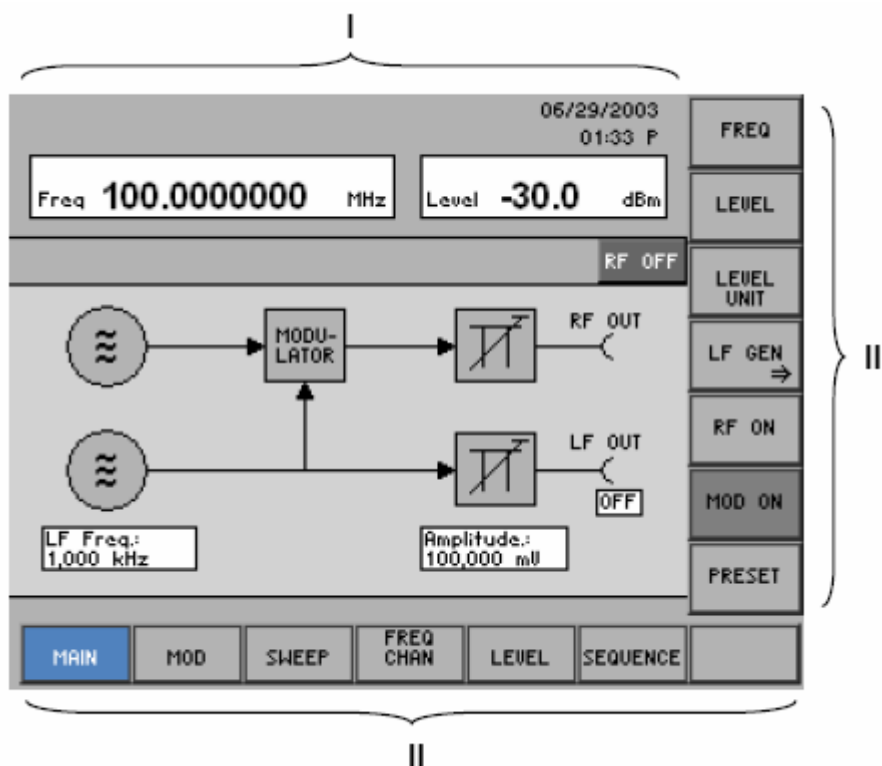
Přepínač ON/STANDBY

1. Indikátor ON/STANDBY
2. Tlačítko SYS - Pomocí tohoto tlačítka se zobrazí systémové menu
3. Tlačítko ESC/CANCEL
4. Tlačítko ENTER
5. Kurzorová tlačítka
6. Kurzorová tlačítka
7. Výstupní nf konektor (konektor typu BNC)
8. Výstupní vf konektor (konektor typu N)
9. Tlačítko jednotek
10. Točítka
11. Numerická tlačítka
12. Funkční tlačítka
13. Obrazovka

Obrazovka poskytuje aktuální informace o událostech a parametrech přiřazených zvoleným funkcím. Režim zobrazení nastavených parametrů, označení funkčních tlačítek a typ nabídky záleží na aktuálním nastavení [13] .

Displej je rozdělen na tři části (Obr. 19):

- I Oblast diagramu
- II Oblast nabídek
- III funkční oblast



Obr. 19. Displej spektrálního generátoru SM300

V oblasti nabídek se zobrazují funkce pro nastavení generátoru. Každá nabídka obsahuje specifické funkce pro nastavení výstupního signálu. Nejčastěji používané funkce pro nastavení parametrů, jako jsou kmitočet (FREQ), úroveň (LEVEL), zapnutí vypnutí signálu (MOD ON/OFF), jsou uspořádány v hlavní nabídce (MAIN). Další parametry je možno nastavit v následujících nabídkách [13].

- MOD parametry modulace (AM, FM, PM)
- SWEEP parametry rozmitání
- FREQ CHAIN speciální nastavení kmitočtu
- LEVEL Speciální nastavení úrovně
- SEQUENCE uživatelské nastavení posloupnosti

1.3.2 Analyzátor R&S FS300

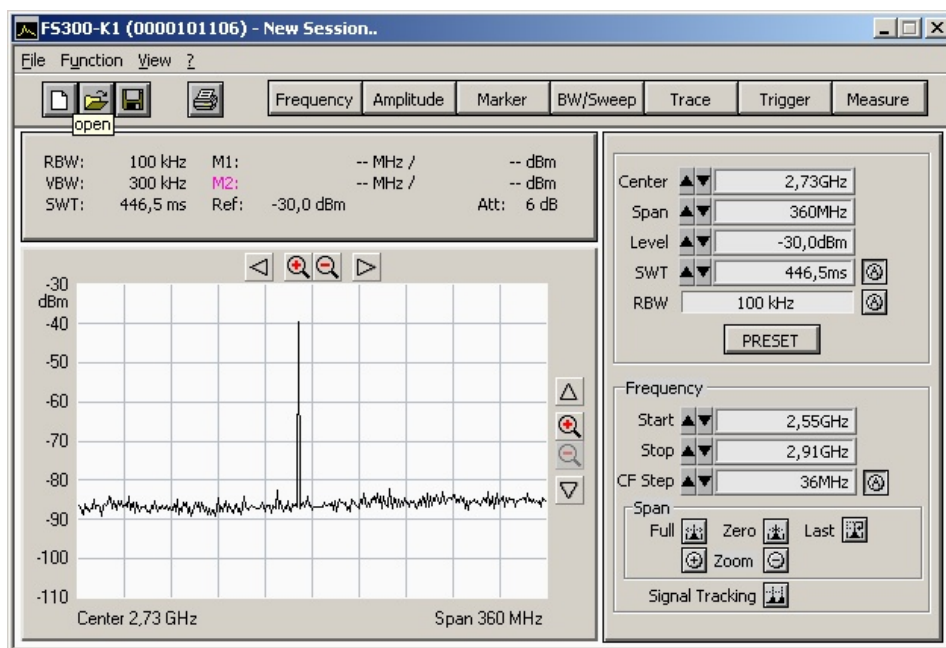
R&S FS300 je přístroj sloužící k přesnému měření a analyzování příslušných modulovaných a nemodulovaných signálů. Spektrální analyzátor R&S FS300 má všechny vlastnosti, vyžadované pro provedení přesného měření úrovně a kmitočtu [14].

Klíčové vlastnosti jsou:

- Rozlišení šířky pásma od 200 Hz do 1 MHz
- Čítač s rozlišením 1 Hz
- Maximální vstupní úroveň +33 dBm
- Vstupní impedance 50 ohm

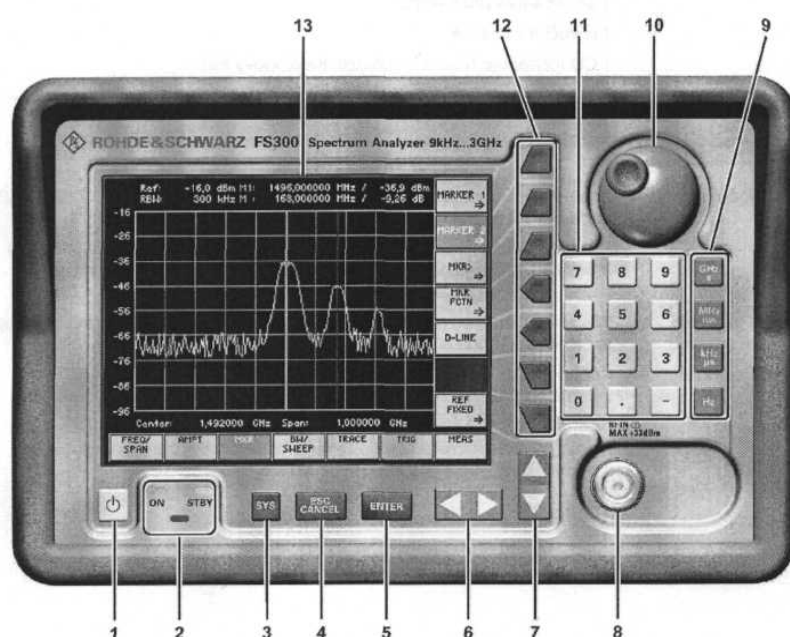
Všechny funkce a parametry měření lze nastavit v nabídkách numerickými tlačítky umístěnými na panelu a točítkem. Aktuální průběh, parametry tlačítek a stavové indikátory, potřebné pro vyhodnocení výsledků, jsou přehledně zobrazené na barevné obrazovce LCD TFT. Analyzátor R&S FS300 je standardně vybaven rozhraním USB pro komunikaci s počítačem.

Pomocí programu FS300-K1 lze přímo z počítače nastavit funkce, parametry a ukládat data do příslušných souborů, které lze dále zpracovat v dalších programech.



Obr. 20. Programové vybavení spektrálního analyzátoru FS300

Čelní pohled na spektrální analyzátor FS300, který je zobrazen na obrázku (Obr. 21).



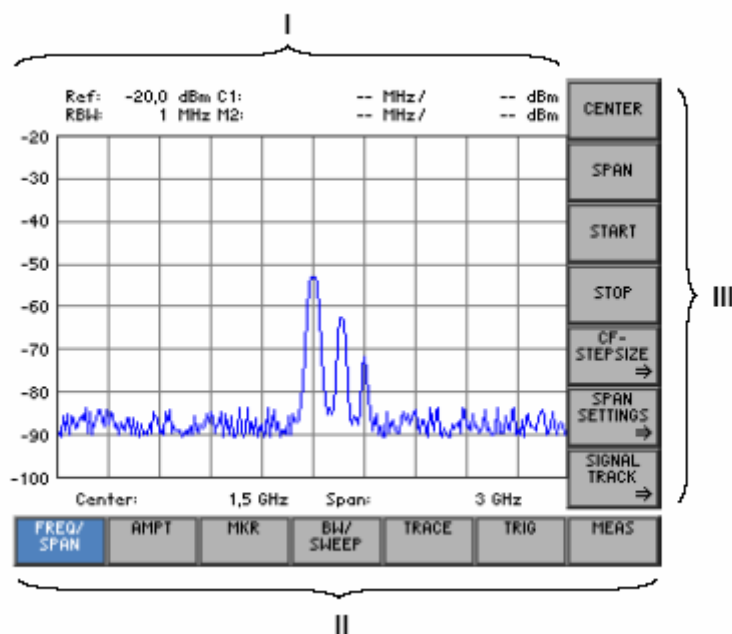
Obr. 21. Přední panel spektrálního analyzátoru FS300

Popis jednotlivých funkcí spektrálního analyzátoru

Provozní vypínač

1. Indikátor stavu ON/STBY
2. Tlačítko SYS
3. Tlačítko ESC/CANCEL
4. Tlačítko ENTER
5. Kurzorová tlačítka
6. Kurzorová tlačítka
7. V_f vstup RFIN
8. Tlačítka jednotek
9. Točítka
10. Numerická tlačítka
11. Funkční tlačítka
12. Obrazovka

Po zapnutí R&S FS300 a úspěšném průběhu autotestu se aktivuje uživatelské rozhraní spektrálního analyzátoru.



Obr. 22. Obrazovka spektrálního analyzátoru FS300

Nabídky používané pro nastavení spektrálního analyzátoru se zobrazují v oblasti nabídek. Na obrazovce (Obr. 22) se zobrazují následující údaje [14]:

FREQ/SPAN - Volba kmitočtového rozsahu (nastavení osy x v oblasti diagramu)

AMPT - Nastavení osy úrovně a vf vstupu (nastavení osy y v oblasti diagramu)

MKR - Analýza signálů s využitím funkcí značek

BW/SWEEP - Nastavení šířky pásma a doby rozmitání

TRACE - Zobrazení průběhu

TRIG - Spouštění měření

MEAS - Měřicí funkce

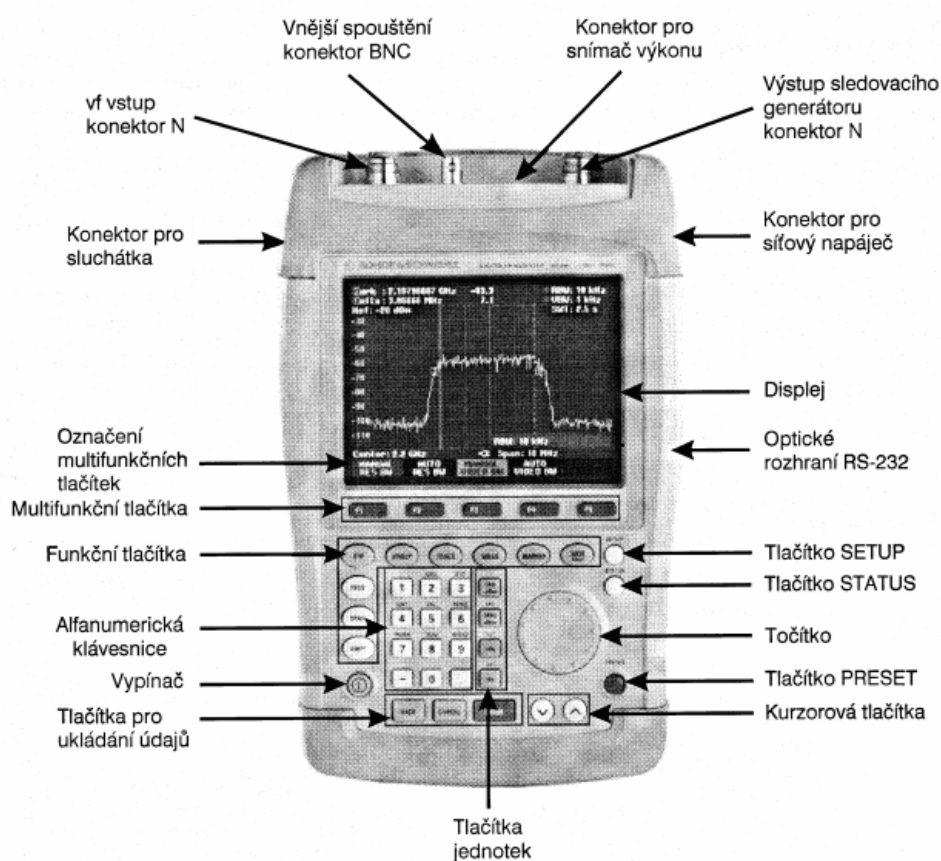
1.3.3 R&S FSH3

Spektrální analyzátor FSH3 (Obr. 23), který je navržen pro práci jak v laboratorních podmínkách, tak i jako servisní přístroj vysokofrekvenčního zařízení. Pro práci mimo elektrickou síť je opatřen dobíjecí baterií a vnitřní CMOS pamětí, která umožňuje

uchovávat až 100 naměřených dat. Data se do počítače kopírují pomocí optického rozhraní RS-232, které omezuje elektromagnetické rušení měření, jenž může být způsobeno připojeným zařízením. Přístroj umožňuje měření pomocí ztrát odrazem pomocí můstku VSWR [15].

Důležité vlastnosti přístroje:

- Frekvenční rozsah 100kHz až 3GHz
- Frekvenční čítač 1Hz
- Rozsah zobrazení +20dBm



Obr. 23. Spektrální analyzátor FSH3

Hlavní nabídka funkčních tlačítek:

FREQ – Nastavení frekvence

SPAN – Nastavení rozsahu

AMPT – Nastavení úrovně

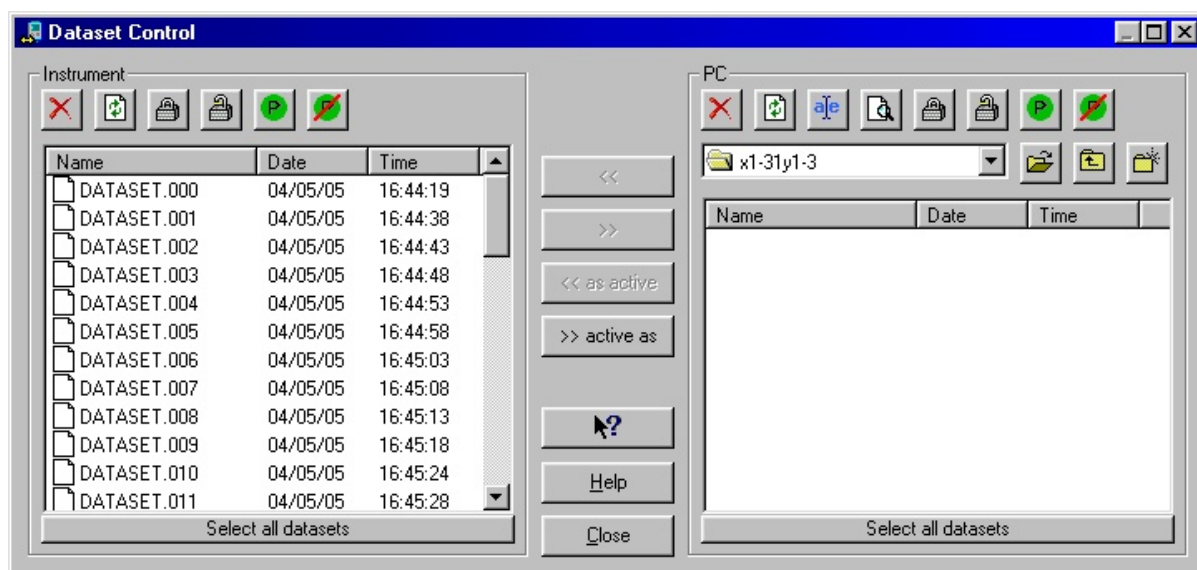
BW – Nastavení šířky pásma

SWEEP – Nabídka rozmítání

TRACE – Nabídka průběhu

Ke spektrálnímu analyzátoru R&S FSH3 je standardně dodáván software FSH3 View, sloužící ke komunikaci počítače s tímto spektrálním analyzátozem. Pomocí FSH3 View lze například přenášet naměřená data, sledovat měření v reálném čase, porovnávat výsledky a mnoho dalších operací s naměřenými údaji.

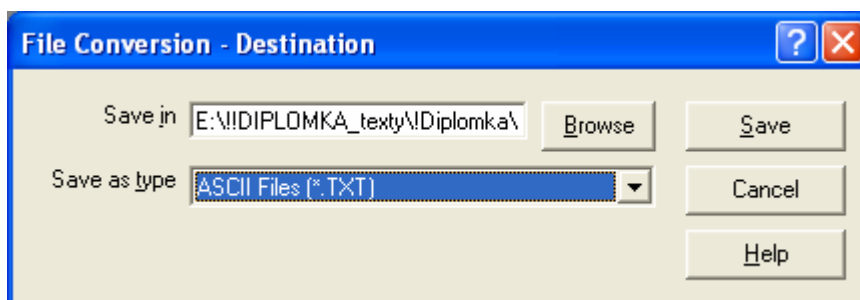
Pro přenos dat ze spektrálního analyzátoru FSH3 do PC je nutné nejprve spojení přes optické rozhraní RS-232. V programu FSH3-View (verze 6.0) se připojíme prostřednictvím tlačítka „connect“ ke spektrálnímu analyzátoru. Poté vyvoláme okno „Dataset Control“, které nám umožní kopírovat data z přístroje do námi zvoleného adresáře. Data jsou ve formátu „rds“. Program Fsh3-View umožňuje také tato data zobrazit pomocí obrázku, změnit a uložit v jiném formátu bmp, png, pcx, wmf, rss, rds, txt [15].



Obr. 24. Okno „Dataset Kontrol“ pro přenos naměřených dat do PC

Přenášení naměřených dat z paměti přístroje FSH3 do PC je velmi zdoluhavé. Přenos dat trvá okolo 5 minut a při velkém vytížení procesoru program neprovede kompletní přenos souborů a musí se proto znovu opakovat.

Pro konvertování souborů s příponou „rds“ na textový soubor „txt“ se provádí pomocí položky „Convert Files...“ v menu „File“.



Obr. 25. Okno pro převod souboru do jiného formátu

Po označení všech souborů s příponou „rds“ a po potvrzení tlačítka „otevřít“ se nám nabídne nové okno s názvem „File Conversion – Destination“ (Obr. 25), kde si zvolíme pomocí tlačítka „Browse“ do jakého adresáře se budou konvertovaná data ukládat. Ve vysouvací položce „Save as type“ si zvolíme námi požadovaný typ souboru. Konverzaci dat potvrdíme tlačítkem „Save“.

2 PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Použité přístroje k měření

Pro měření byl použit přístroj FSH3, který má v sobě zabudovaný spektrální generátor i analyzátor. Po kalibraci spektrálního generátoru a analyzátoru bylo možno změřit rezonanční křivku koaxiálního mikrovlnného rezonátoru, která se ukládala přímo do paměti přístroje.

Spektrálního generátor SM300 a spektrální analyzátor FS300 byly propojeny kabelem pro synchronizaci a nastaveny podle návodu k jednotlivým přístrojům. Jelikož nebylo možné nastavit synchronizaci přístrojů nebylo možné naměřit rezonanční křivku koaxiálního mikrovlnného rezonátoru.

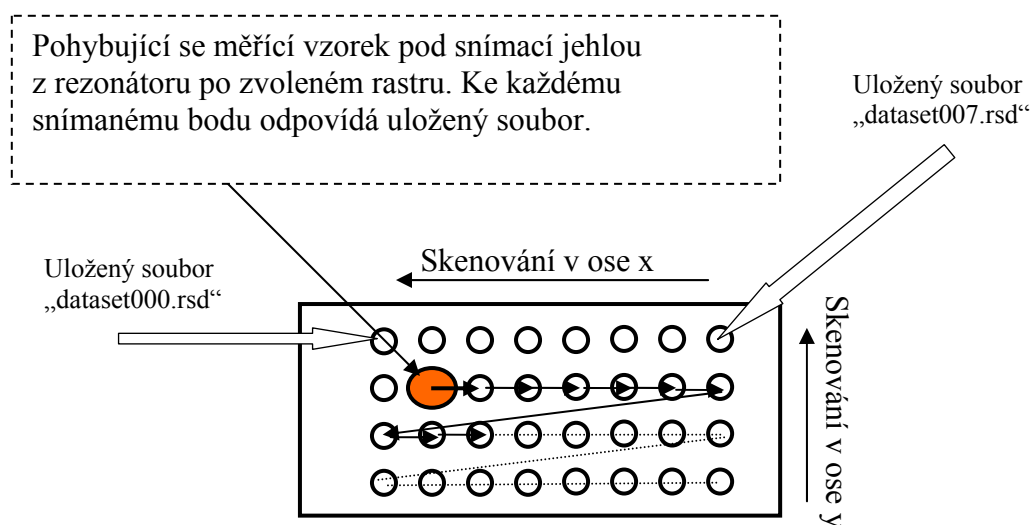
Veškerá měření se prováděla na přístroji FSH3 z těchto důvodů:

- Doba pro uložení dat do přístroje FSH3 je 5-krát kratší než u přístroje FS300.
- Přístroj FS300 umožňuje uložit pouze 5 průběhů do paměti.
- Přesnost měření obou přístrojů FSH3 a FS300 jsou stejná.

Proto se hlavní důraz kladl na zpracování dat FSH3 a na hledání nedostatků chyb při měření. Snahou bylo tyto chyby eliminovat, či navrhnout další řešení, které by spělo k přesnějším výsledkům.

2.2 Stručný úvod do vyhodnocování dat

Hlavním principem rastrovacího mikroskopu je, že se jehla nebo snímáný vzorek posouvá po rastru, kde v každém bodě je uložena rezonanční křivka. Rezonanční křivka je vyhodnocována pomocí programu „FSH3m“, jež je vytvořeno v programovém prostředí MATLAB6.0. Při procesu vyhodnocování dat je nejprve snímána celá osa x s konstantním krokem po níž se posune osa y o konstantní krok. Po projetí celého snímaného vzorku se vytvoří rastr např. 21x21 (Obr. 26). Při rastru 21x21 naměříme celkem 441 souborů a protože spektrální analyzátor uloží jen 100 hodnot (souborů), musí se měření rozdělit na více částí.



Obr. 26. Pohyb měřeného vzorku pod snímacím hrotem

2.2.1 Převod souboru na rastr

Po konvergování pomocí softwaru FSH3View u rastru 21 x 21 jsme dostali více souborů ve formátu např. dataset000.txt až dataset083.txt (převod souborů na textový soubor „txt“ popisuje kapitola 1.3.3), které se musí přejmenovat na rastr, jež byl snímán jehlou. K tomu slouží program „rastr.m“ v programovém prostředí MATLAB. Program se nahraje do adresáře, kde chceme přejmenovat soubory a spustí se příkazem „rastr“.

Program načte v aktuálním adresáři soubory podle jména a vypíše je. Po té je nutné do programu zadat tyto hodnoty (pro rastr 21 x 3 od počátku):

- Od jaké hodnoty bude počátek rastru x ($x = 1$).
- Do jaké hodnoty bude rastr na ose x ($x = 21$).
- Od jaké hodnoty bude počátek rastru y ($y = 1$).
- Do jaké hodnoty bude rastr y ($y = 3$).

Jednou z nabídek programu je, zda chceme vidět simulaci přejmenování, nebo soubory rovnou přejmenovat. Program při přejmenování nebo simulaci vypisuje název souboru, který je přejmenován a přejmenovaný soubor pro vizuální kontrolu.

Ukázka:

Soubor: _DATASET062.txt přejmenován na rastr: _x21y3.txt

Přejmenování na rastr je nutné pokud chceme vyhodnotit povrch materiálu, pomocí programu „FSH3m“, který je popsán v následující kapitole.

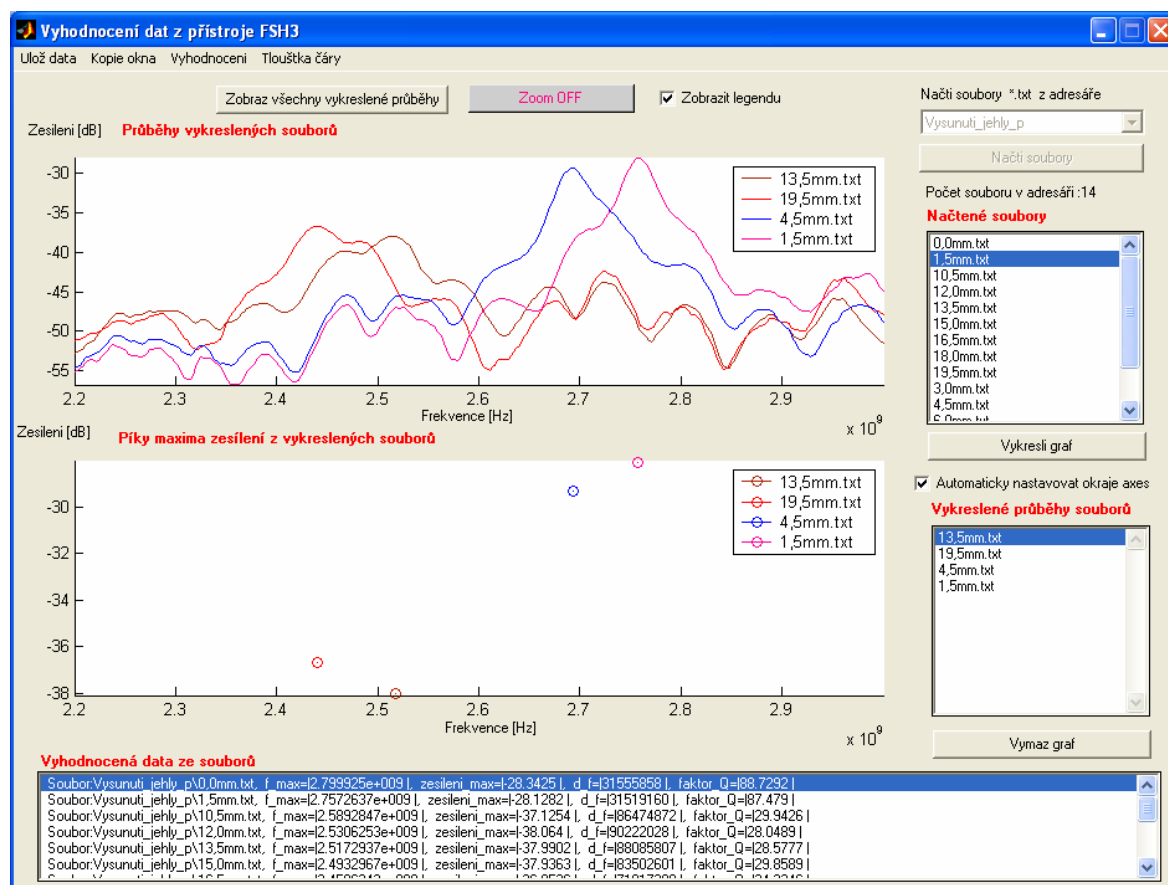
2.3 Jak pracovat s programem FSH3m

Program byl navržen pro vyhodnocování rezonančních křivek a vizuální porovnání až 20 rezonačních křivek. Program byl vytvořen v prostředí GUI, jenž je součástí MATLABu (ver.6.5). Hlavním cílem programu je jednoduchá obsluha, zamezení kritických situací, velká dostupnost funkcí.

Program se spouští příkazem „FSH3m“ a je zobrazen na obrázku (Obr. 27). Po spuštění programu si v menu „Vyhodnocení“ zvolíme, zda se bude vyhodnocovat maximum nebo minimum z rezonanční frekvence. Rovněž si můžeme zvolit útlum (1-5dB) pro výpočet faktoru kvality, který se počítá z maximálního nebo minimálního zesílení z rezonanční frekvence. Z vysouvací nabídky (popup-menu), který má nad sebou název „načti soubory *.txt“, si zvolíme adresář, ze kterého se budou načítat soubory. Po zvolení adresáře se ukáže počet souborů v daném adresáři.

U zaškrtačkové položky (checkbox), „Načíst hodnoty x, y, z názvu souboru a tyto hodnoty použít jako rastr“ si zvolíme, zda se bude načítat rastr z názvu souboru, který určuje pozici v matici faktoru kvality a maxima frekvence. Položku je nutné mít zaškrtnutou v případě, kdy chceme zobrazit povrch materiálu v dalším programu „graf3D“. Tento program podrobněji popisuje kapitola „2.5 Jak pracovat s programem Graf3D“. Jak převést naměřené soubory na rastr popisuje kapitola 2.2.1.

Tlačítkem „načti soubory“ se načtou a vyhodnotí všechny soubory v adresáři. Počet procent načtených souborů a rovněž vyhodnocených souborů se zobrazuje na tlačítku. V názvu okna (title figure) programu se vypočítá orientační čas k zpracování všech souborů.



Obr. 27. Programové prostředí „FSH3m“

Po načtení všech souborů se v dolním rolovacím okně (listbox) „Vyhodnocená data ze souborů“ zobrazí všechna vyhodnocená data. Každá položka v rolovacím okně popisuje jméno souboru, ze kterého byla data vyhodnocena, frekvenci kde je zesílení maximální (f_{max}), hodnotu maximálního zesílení (z_{max}) z rezonanční frekvence, šířku pásma (d_f) a faktor kvality ($faktor_Q$). Pokud zvolíme na začátku programu v menu „Vyhodnocení“ vyhodnocovat minimum, změní se pouze položky, frekvenci kde je zesílení minimální (f_{min}) a minimální zesílení (z_{min}) z rezonanční křivky.

V rolovacím okně (listbox) „Načtené soubory“ se zobrazí všechny vyhodnocené soubory. Po zvolení souboru myši si můžeme zobrazit průběh naměřené rezonanční křivky v daném souboru pomocí tlačítka „Vykresli graf“.

Označená položka v rolovacím okně „Načtené soubory“ se při kliknutí pravým tlačítkem myši vyhledá vyhodnocená data v dolním rolovacím okně „Vyhodnocená data ze souborů“.

Vymazat zobrazenou křivku lze v dolním rolovacím okně „Vykreslené průběhy souborů“. Po zvolení souboru, jenž chceme v průběhu vymazat zmáčkneme tlačítko „vymazat graf“.

V programu se dále vyskytuje zaškrťovací tlačítko (checkbox) „Automaticky nastavovat okraje axes“, které zabezpečuje to, že při vykreslování budou zobrazeny všechny průběhy a automaticky se budou nastavovat okraje zobrazení jak při vykreslení, tak při vymazání rezonanční křivky.

Dvoupolohové tlačítko (Toggle button) „Zoom OFF“, je tlačítko, které zabezpečuje aktivní přiblížování oken „Průběhy vykreslených souborů“ a „píky maxima zesílení z vykreslených souborů“. Tlačítko má dvě funkce: „Zoom ON“ přiblížení je aktivní a „Zoom OFF“ přiblížení je vypnuté.

Pro zpětné zobrazení při přiblížení slouží tlačítko (Push button) „Zobrazit všechny vykreslené průběhy“ má stejnou funkci jako zaškrťovací tlačítko „Automaticky nastavovat okraje axes“, jenž zobrazí všechny vykreslené průběhy.

Tloušťku vykreslených rezonančních křivek si lze zvolit v menu „tloušťka čáry“, která je odstupňovaná velikostí od 1 do 3.

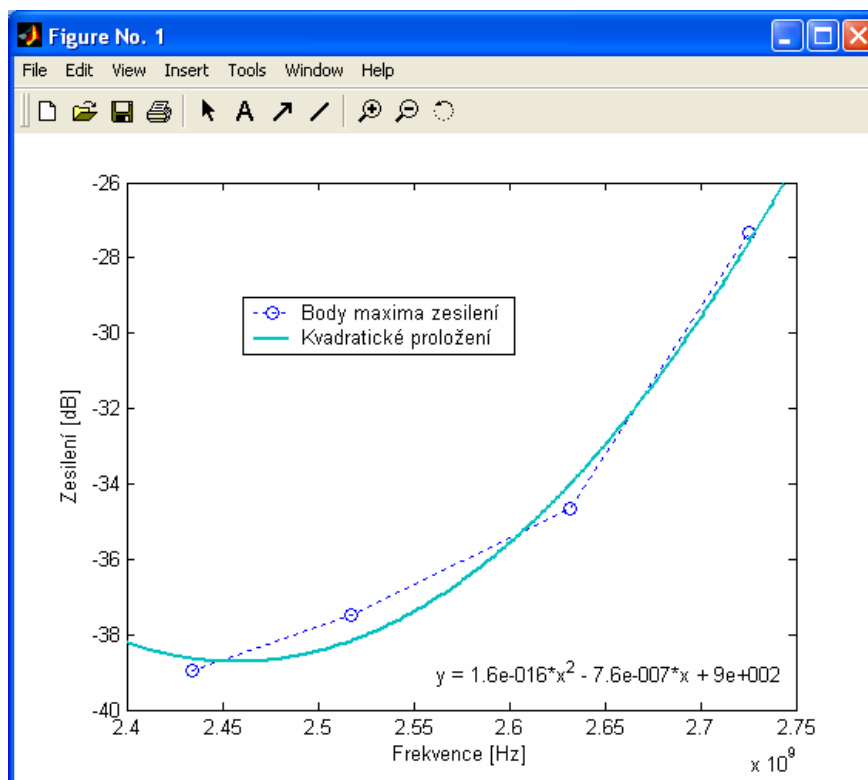
Zaškrťovací položka (checkbox) „zobraz legendu“ určuje, zda je legenda viditelná či nikoliv.

V menu „Kopie okna“ jsou na výběr 3 položky :

- Průběhy vykreslených souborů.
- Maxima píky z vykreslených souborů.
- Kopie jen bodů maxima píky.

První dvě položky přesně kopírují zvolené okno do nového okna (figure), které má standardní nastavení okna (figure) v Matlabu. Nové okno (figure) umožňuje různě měnit vlastnosti jednotlivých objektů podle vlastního uvážení. Z vlastností si můžeme zvolit: typ, tloušťku, barvu zobrazené čáry. Průběhy v novém okně lze exportovat jako obrázek do dalších programů jako např. „Microsoft Word“ a mnoho dalších funkcí, které jsou součástí standardního okna (figure) v Matlabu – Obr. 28.

Poslední položka „Kopie jen bodů maxima píku“ je kopie jen bodů okna (axes) „Píky maxima zesílení z vykreslených souborů“ do nového okna (figure). V tomto okně můžeme vykreslené body proložit lineární rovnicí, kvadratickou rovnicí, polynomiální rovnicí 5-10 stupně, jenž jsou implementovány v novém okně a jsou součástí Matlabu (Obr. 28).



Obr. 28. Kvadratické proložení maxima píku rezonanční frekvence

Uložení vyhodnocených dat z programu „FSH3m“ je možné v menu „Ulož data“, které nabízí tyto možnosti:

„Struktura souboru“:

Ukládá strukturovanou proměnou, jenž v sobě uchovává všechna načtená data ze souboru a vyhodnocená data.

„Faktor kvality“:

Uloží matici kvality, pro další zpracování v programu „graf3D“. Položka je aktivní pouze pokud byla před vyhodnocováním dat zaškrtnuta zaškrtačková položka „Načíst hodnoty x, y, z názvu souboru a tyto hodnoty použít jako rastr“.

„Maximální frekvence“:

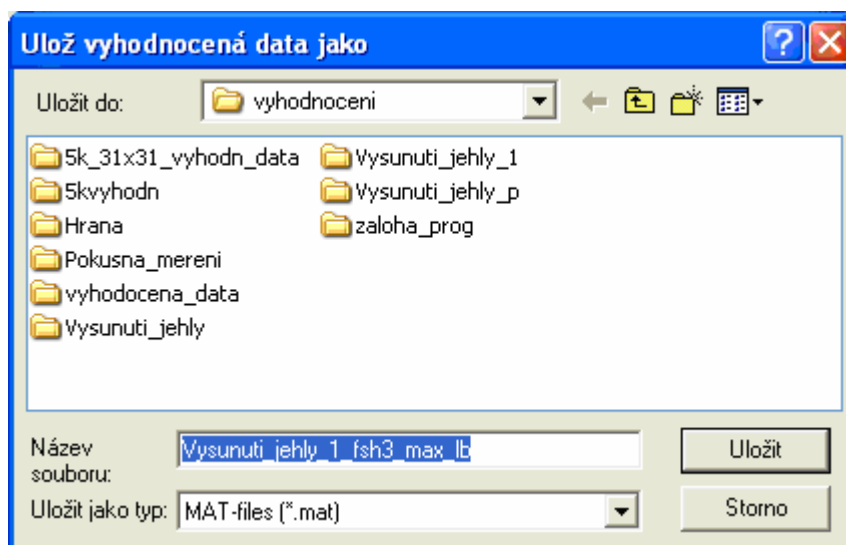
Uloží matici frekvenci maximálního zesílení, pro další zpracování v programu „graf3D“. Položka je aktivní pouze pokud opět bylo zaškrtnuto před vyhodnocováním dat zaškrťovací položka „Načíst hodnoty x, y, z názvu souboru a tyto hodnoty použít jako rastr“.

„Dolní listbox“:

Uloží data, které jsou zobrazena v dolní rolovacím okně (listbox) „Vyhodnocená data ze souborů“, pro další zpracování v jiných programech.

Při ukládání se objeví okno, jenž je zobrazeno na obrázku (Obr. 29), ve kterém se název souboru skládá ze: jména adresáře z něhož byla data načtena, jakým programem byly vyhodnocena data, (zda se vyhodnocovalo minimum či maximum z rezonanční křivky, je uvedeno ve jménu souboru zkratkou min nebo max). Dalším identifikátorem souboru je typ, který udává jaká data byla uložena:

- St (struktura souboru)
- mq (matice kvality)
- fr (matice maxima frekvence)
- lb (dolní listbox), rolovací okno s názvem „Vyhodnocená data ze souborů“.



Obr. 29. Uložení vyhodnocených dat do souboru

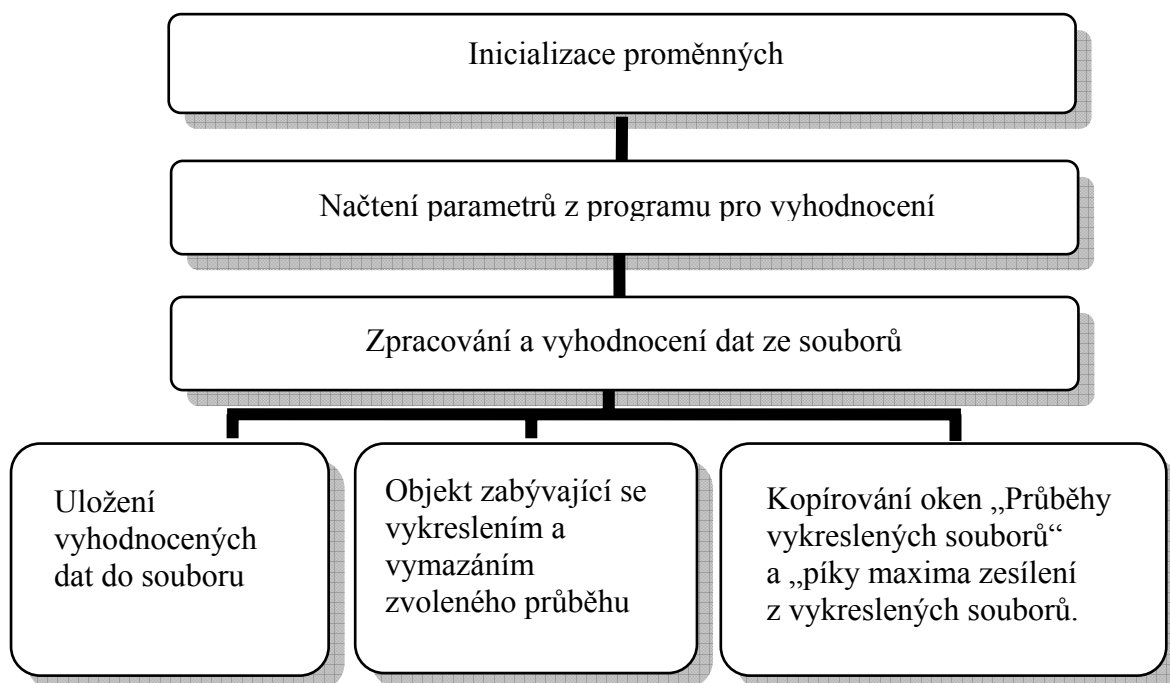
Uložení souboru lze uložit ve formátu mat-file, nebo v textovém formátu s koncovkou „tx“ pro pozdější import dat ze souboru k dalšímu zpracování v jiných programech. Import dat do programu „Microsoft Excel“ popisuje kapitola „3.6 Import vyhodnocených dat do programu Microsoft Excel,“. Pokud uživateli nevyhovuje počet a barvy zobrazených rezonačních křivek, může si sám nadefinovat tyto parametry v souboru „matice_barev.txt“.

Pro vyhodnocení dat ze spektrálního analyzátoru SM300 slouží program „SM300m“, který má stejné funkce i vizuální podobu jako program „FSH3m“. Program „SM300m“ se od „FSH3m“ liší pouze v načítání dat vyhodnocených souborů.

2.4 PROGRAM FSH3m z programového hlediska

V následujících dvou kapitolách je stručně popsán princip programu po programové stránce, jenž by měla vystihnout hlavní strukturu programu „FSH3m“, která by měla sloužit pro lepší pochopení zdrojového kódu programu.

2.4.1 Stručný vývojový diagram programu „FSH3m“



2.4.2 Stručný popis vývojového diagramu programu „FSH3m“

Inicializace proměnných

- Nastavení výchozích parametrů jednotlivých komponent.
- Vytvoření globálních proměnných.

Načtení parametrů z programu pro vyhodnocení

- Volba adresáře, ze kterého se budou načítat soubory.
- Vyhodnocování maxima nebo minima z rezonanční křivky.
- Zesílení 1-5 dB pro výpočet faktoru kvality.
- Načítání rastru x, y, ze souboru.

Zpracování a vyhodnocení dat ze souboru, jenž se provádí pomocí tlačítka “načti soubory”

- Načtení všech souborů z aktuálního adresáře.
- Zpracování a uložení všech dat z načtených souborů do strukturované proměnné “struktura”.
- Nalezení maximálního zesílení z rezonanční křivky a uložení odpovídající frekvence do matice “frekvence_quality” a rovněž výpočet faktoru kvality, který se ukládá do matice “matice_quality”.

Uložení dat do souboru

- Uložení matice faktoru kvality do souboru k dalšímu zpracování.
- Uložení matice maximum frekvence do souboru k dalšímu zpracování.
- Uložení vypočítaných parametrů, které jsou zobrazeny dolním rolovacím okně (listbox) “vyhodnocená data ze souborů” do souboru pro zpracování v jiných programech jako např. Microsoft Excel.

Vykreslení a vymazání zvoleného průběhu rezonanční frekvence a maxima zesílení

- Vykreslení se provádí pomocí tlačítka „vykresli graf“. Vykreslí se data ze souboru, který je označen v horním rolovacím menu (listbox) „Načtené soubory“. Po vykreslení rezonanční křivky se uloží do inkrementované matice „objekt_plot“ odkaz (handles) na již vykreslenou rezonanční křivku (line) a při tom se změní parametry objektu (line) barva a typ čáry.
- Po vykreslení bodu maxima zesílení se uloží do inkrementované matice „objekt_plot_puntik_max“ odkaz na již vykreslený bod, který definuje zobrazený bod a při tom se změní parametry objektu jako barva a typ bodu.
- Smazání křivky se provádí tlačítkem „Vymaž graf“. Při vymazání označeného souboru z rolovacího okna (listbox) „Vykreslené průběhy souborů“ označený soubor vrací na pozici v matici „objekt_plot“, jenž identifikuje odkaz na konkrétní objekt „line“ (průběh rezonanční frekvence), který se vymaže v matici „objekt_plot“ a po té zruší objekt „line“. To samé platí pro bod maxima zesílení. Nalezne se konkrétní odkaz na objekt, který má být vymazán v matici „objekt_plot_puntik_max“ a po té vymazán z matice a objekt zrušen.

Kopírování oken (axes) „Průběhy vykreslených souborů nebo píky maxima zesílení“

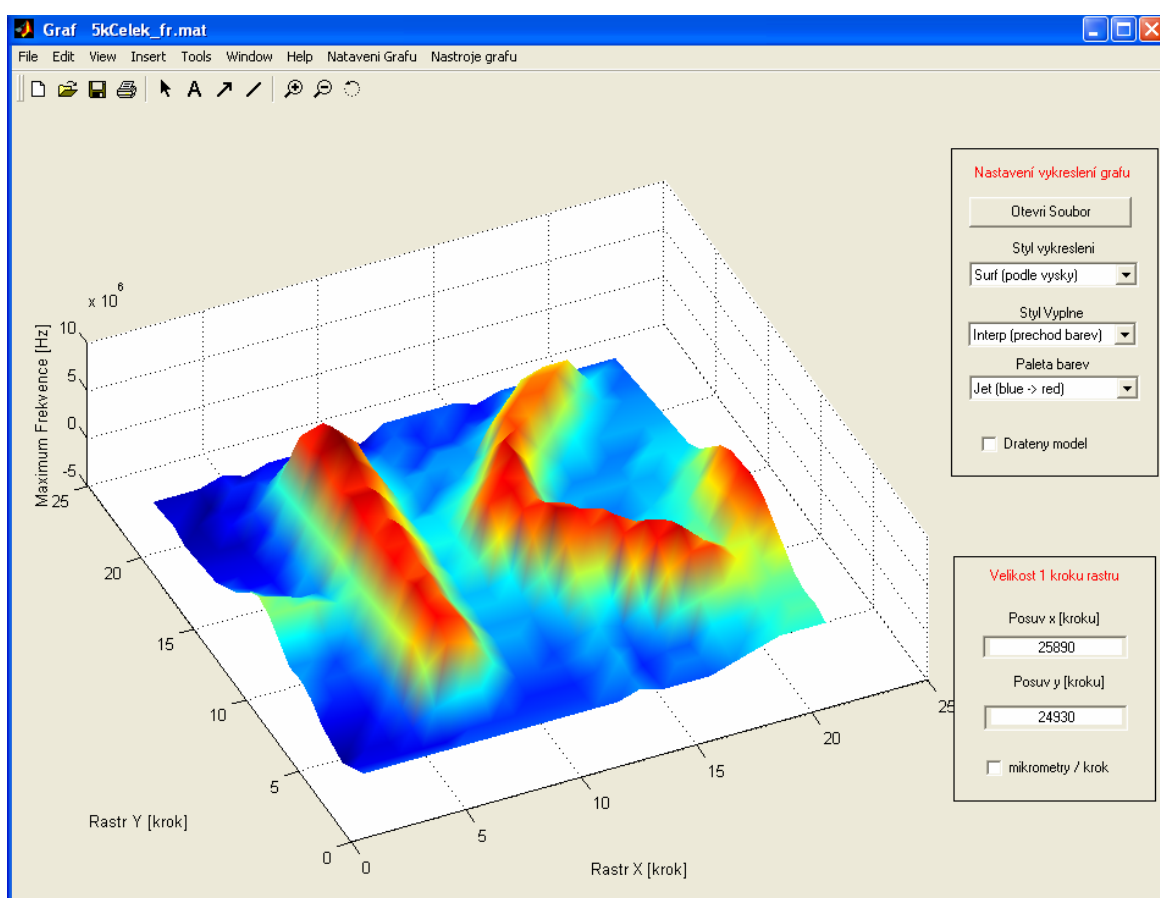
- Vytvoření kopii okna „průběhy vykreslených souborů“
- Vytvoření nového okna (figure)
- Načtení všech odkazů na objekt „line“ z matice „objekt_plot“
- Zkopírování načtených objektů do nového okna

Vytvoření kopie okna „maxima píky“

- Vytvoření nového okna (figure)
- Načtení všech odkazů na objekt „line“ z matice „objekt_plot_puntik_max“
- Zkopírování načtených objektů do nového okna (figure)

2.5 Jak pracovat s programem Graf3D

Program je naprogramován ve vývojovém prostředí GUI, jenž je součástí programu MATLAB ver.6.5. Program „Graf3D“ slouží k vykreslení povrchu snímaného vzorku z vyhodnocených dat z programu „FSH3m“, který je popsán v předchozí kapitole. Za vyhodnocená data se považuje jen matice faktoru kvality a matice maximum frekvencí. Spuštění programu se provádí příkazem „Graf3d“ a je zobrazen na obrázku (Obr. 30). Program dává přednost souborům s příponou „mat“, ale lze jím načíst i textové soubory „tx“. U textového souboru program zjišťuje, zdali se jedná o správné data.



Obr. 30. Grafické rozhraní programu „Graf3D“

Načtení vyhodnocených dat pro vykreslení se provádí pomocí tlačítka „otevři soubor“. Po načtení dat se obrázek ihned vykreslí a pomocí různých nastavení na paletě „Nastavení vykreslení grafu“ můžeme volit vizuální zobrazení grafu. Například styl vykreslení, styl výplně a barvy zobrazení. Zde jsou stručně popsány jednotlivé položky z výsuvných menu (popup menu), kde jméno položky je složeno z příkazu a stručného

popisu. Detailnější popis k jednotlivých příkazů lze najít v nápovědě MATLABu ver.6.5 [16]. Jednotlivé položky v paletě „Nastavení vykreslení grafu“ jsou následovně popsány:

Styl vykreslení

- Surfl (zobrazení podle výšky)
- Surfl (zobrazení podle odlesku)
- Mesh (sít'ové zobrazení)
- Meshz (sít'ové zobrazení s hranou)
- Waterfall (kaskádovité zobrazení)
- Pcolor (plošné zobrazení, "2D")

Styl výplně

- Faceted (s hladkou plochou a mřížkou)
- Flat (broušená plocha)
- Interp (s lineárním přechodem barev)

Paleta barev

- Hsv (červená – červená)
- Jet (modrá – červená)
- Cool (modrá – růžová)
- Bone (modrá – bílá)
- Hoc (červená – žlutá)
- Gray (šedá paleta)
- Pink (hnědá paleta)
- Copper (tmavě hnědá)
- Flag (vlajkově)
- Lines (linkovitě)

Druhá paleta „Velikost 1 kroku rastru“ slouží k přepočtu rastru na osách x , y , na skutečný rozměr měřeného vzorku. Do editovacího pole „posuv x (kroku)“ a „posuv y (kroku)“ se zadává velikost 1 kroku rastru, který byl použit při skenování u mikroposuvů v ose x a y . Více o mikroposuvech se dozvíte v diplomové práci kolegy [17], který se tímto problémem zabýval podrobněji. V příloze je tabulka, kde jsou popsány velikosti kroků k jednotlivým měřením. Zaškrťovací komponenta (checkbox) „Krok/mikrometry“, určuje, zda bude na osách x , y , zobrazen skenovaný rastr nebo skutečný rozměr.

Program dědí všechny vlastnosti výchozího okna (figure), jako například otočení, přiblížení, uložení, stínování a mnoho dalších funkcí, které jsou součástí vlastností výchozího okna (figure) v Matlabu a jednotlivé funkce jsou popsány v nápovědě Matlab6.5. V menu byly přidány 2 položky „Nastavení grafu“ a „Nástroje grafu“.

V položkách „Nastavení grafu“ se mění vizuální vzhled zobrazeného grafu dle uživatelských požadavků. Jednotlivé položky jsou popsány následovně:

Pozadí okna

- bílé
- černé
- šedé

Body skenování

Typ bodu

- kolečko
- křížek
- čtverec
- hvězda
- bez bodu

Barva bodu

- bez barvy
- načti barvu

Velikost bodu

- 1
- 2
- 4
- 6

Výplň bodu

- bez barvy
- načti barvu

Mřížka

Styl čáry

- plná
- čárkovaná
- čerchovaná
- bez čáry

Velikost čáry

- 1
- 2
- 3
- 5
- bez čáry

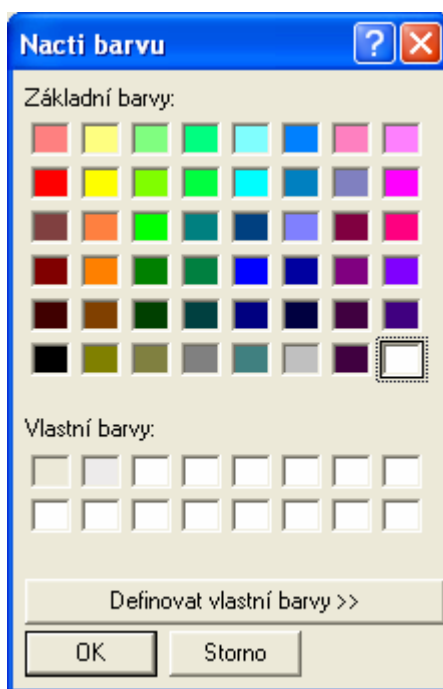
Barva mřížky

- načti barvu
- bez barvy
- přizpůsobit k výplni mřížky

Výplň mřížky

- načti barvu
- bez výplně mřížky

Jednotlivé položky v nabídce jsou popsány výstižně a proto není třeba detailněji popisovat jejich funkci. Jen při načítání barvy se otevře nové okno s paletami barev (Obr. 31), kde si uživatel vybere danou barvu, kterou chce použít.



Obr. 31. Paleta barev

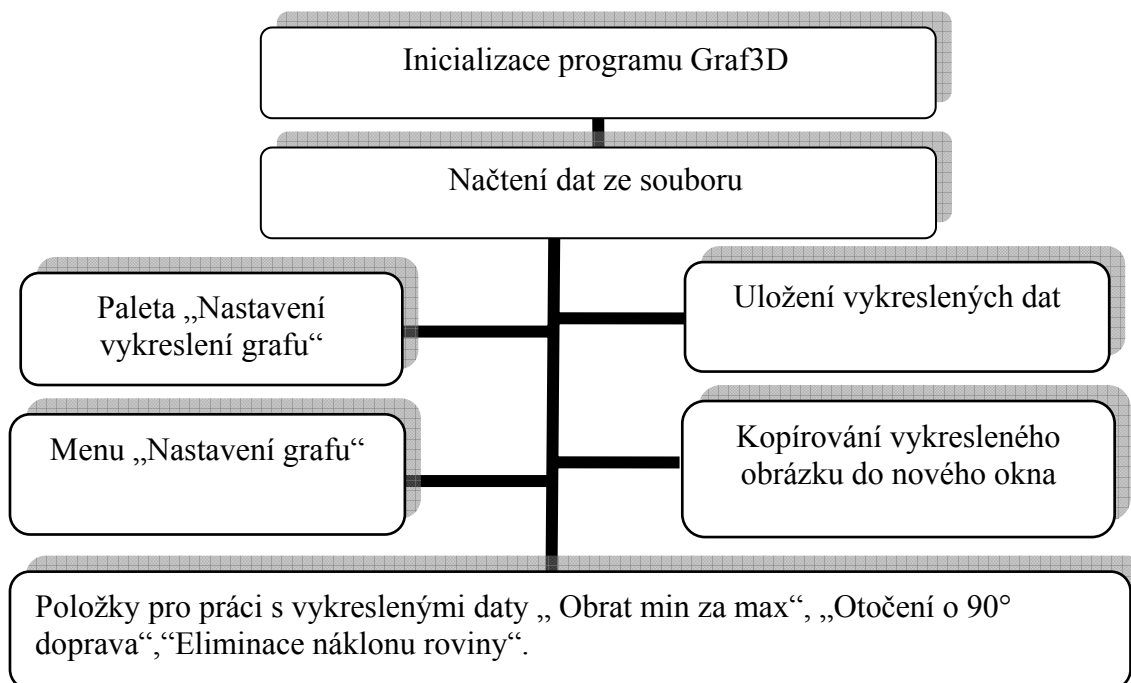
Další položkou v menu je „Nástroje grafu“, která se zabývá úpravou vyhodnocených dat, jenž jsou zobrazeny. První položkou je „obrat min za max“, která invertuje propadlá místa na výstupky. Přesně to znamená, jako by se obrázek převrátil o 180° okolo své roviny. Tato operace je zobrazena na obrazcích (Obr. 38 a Obr. 40). Další položkou je „Otočení o 90°“, která má za úkol otočit data v matici o 90° doleva, jenž se po vizuální

stránce projeví tak, že se celý obrázek otočí o 90° doleva. Tato operace je velmi důležitá pro další položku „Eliminace nakloněné roviny“, která má za úkol sklopit nakloněnou rovinu pro lepší vizuální náhled naměřeného vzorku. Pro správné sklopení roviny se musí obrázek natočit tak jak je zobrazeno na obrázku (Obr. 40), protože ke správnému sklopení musí být i správně natočena matice s naměřenými daty. Veškerá upravená data lze opět uložit do souboru pomocí položky „Ulož data do souboru“, s příponou „mat“ nebo „tx“. Soubory uložené v programu „Graf3D“ mají jako identifikátor programu koncovku jména souboru „gr“.

2.6 PROGRAM Graf3D z programového hlediska

V následujících dvou kapitolách je stručně popsán princip programu po programové stránce, jenž by měla vystihnout hlavní strukturu programu „Graf3D“, která by měla sloužit pro lepší pochopení zdrojového kódu programu.

2.6.1 Stručný vývojový diagram programu Graf3D



2.6.2 Graf3D po programové stránce

„Inicializace programu Graf3D“

Inicializace proměnných a komponent v paletě „nastavení vykreslení grafu“ a vytvoření vektoru příkazů „prikaz“, který sebou nese tyto parametry:

prikaz = {styl vykreslení, styl výplně, paleta barev, barva pozadí, popisek osy x, popisek osy y, popisek osy z}.

„Načtení dat ze souboru“

Načtení dat ze souboru se provádí pomocí tlačítka „Otevři soubor“, které se načtou do matice „mat_data“ a po té zobrazí do komponenty „axes“.

Paleta „Nastavení vykreslení grafu“

Změnou položky v paletě „Nastavení vykreslení grafu“ se změní vektor příkazů „prikaz“. Následně se volá procedura „zobraz_graf“, která provede veškeré příkazy jenž obsahuje vektor.

Menu „Nastavení grafu“

Při změnách v položkách menu „Nastavení grafu“ a paletě „velikost 1 kroku rastru“ se vždy změní parametry komponenty „axes“ nebo jeho potomka „surface“, které se ihned promítnou ve vykreslení obrázku.

Kopírování vykresleného obrázku do nového okna

O vytvoření nového okna se stará procedura „menu_kopiruj_okno_Callback“, která vytvoří nové okno (figure) a zkopíruje do něj všechny vlastnosti komponenty „axes“ a potomka „surface“ z programu „Graf3D“.

Položky pro práci s vykreslenými daty

Položky v menu „Nástroje grafu“ přepočítává data v matici „mat_data“, podle druhu zvolené položky. Podrobnější informace lze najít ve zdrojovém kódu programu „Graf3D“.

Uložení vykreslených dat

Při různých změnách v matici „mat_data“ si můžeme změněná data opět uložit do námi zvoleného souboru s příponou „mat“ nebo „tx“. Tyto data slouží pro opětovné zobrazení v programu „Graf3D“, nebo pro zobrazení v dalších programech jako např. Microsoft Excel.

2.7 Hardwarové požadavky

Pro přenášení dat ze spektrálního analyzátoru FSH3 je potřeba PC s minimální konfigurací procesorem 220Mhz, 32MB RAM operační paměti.

Programy FSH3m, Graf3D, Rastr má požadované minimální rozlišení obrazovky 1024x768 pixelů. Optimální konfigurace pro výpočty a zobrazení je PC s procesorem 1Ghz, 256MB RAM operační paměti, Grafická karta s podporou Directx 8.1.

3 MĚŘENÍ

Jednotlivá měření byla prováděna na spektrálním analyzátoru FSH3. Posunutí vzorku bylo za pomoci mikroposuvů M-110.1DG, jenž mají nejmenší dosažitelný snímaný posuv o 0,05 mikrometru. Snímání měřeného vzorku bylo po rastrech v ose x a y. Pro první měření jsme si vybrali rastr 20 x 20 s největším možným rozlišením 5 mm x 5 mm část symbolu „5“, který je značen bílým rámečkem na obrázku (Obr. 32) a detailnější zvětšení na obrázku (Obr. 33). Jako druhé měření jsme si zvolili písmeno „K“ opět s rastrem 20 x 20 o rozměru 3mm x 3mm, jež je zobrazeno na obrázku (Obr. 32) černým rámečkem. U třetího měření jsme si zvolili číslo „4“ z letopočtu mince, který je zobrazen na obrázku (Obr. 45) s jemnějším rastrem 40 x 40 o rozměru 1,5 mm x 1,5 mm. Jako poslední měření jsme si zvolili opět písmeno „K“ s jemnějším rastrem 30 x 30 o rozměru 3 mm x 3 mm. Jednotlivá měření jsou popsána v následujících kapitolách.



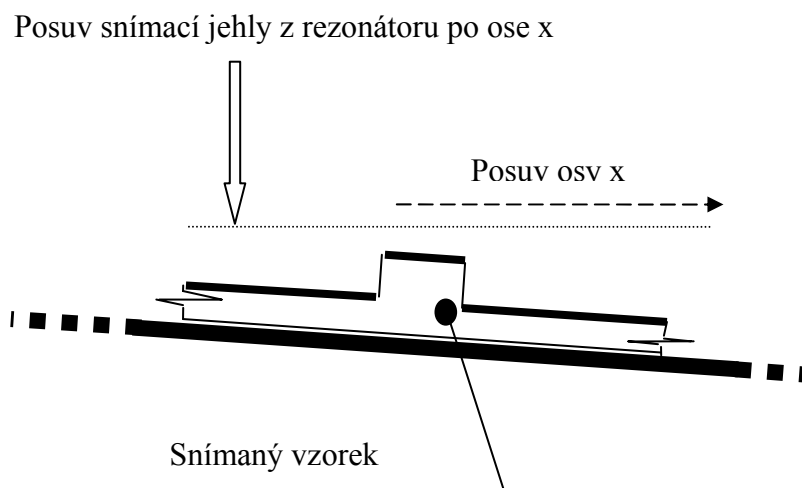
Obr. 32. Celkový pohled na snímaný vzorek



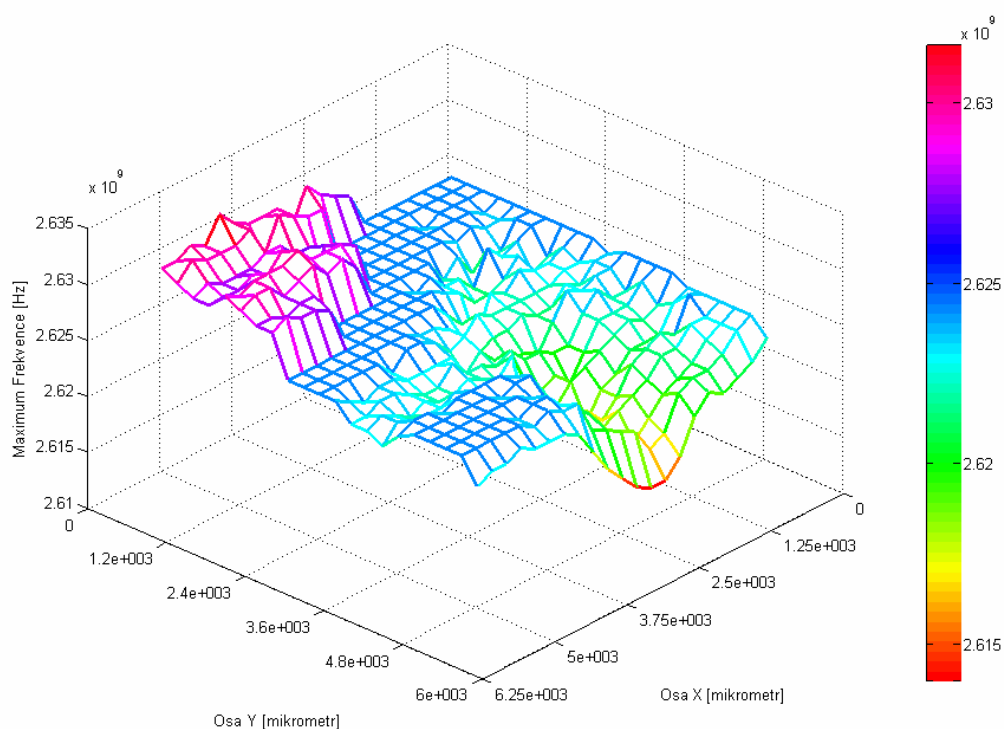
Obr. 33. Část snímaného vzorku mince pořízený optickým makrem.

3.1 Snímaný vzorek části čísla „5“

Po vyhodnocení dat jsme naměřená data zobrazili v programu „graf3D“, která jsou zobrazena na obrázcích (Obr. 35 a Obr. 36). Zobrazený obrázek je vykreslen na základě maximální frekvence a bez žádné úpravy dat. Skenovaný objekt části čísla „5“ je vidět na obrázku (Obr. 35) jako propadlou část, kde modrá část je povrch mince. V levém rohu je vidět kopcovitý tvar, který je způsobený náklonem skenované mince v ose x a y, kdy hrot jehly je nejdále od povrchu mince. Tento jev zobrazuje obrázek (Obr. 34). Ze začátku skenování byl hrot jehly nejbližší skenovanému vzorku „5“ a proto je tak zřetelná prohlubeň. Ke konci skenování v ose x a y je hrot jehly nejdále od vzorku a proto není tak zřetelná prohlubeň konce oblouku „5“. Náklon roviny snímaného vzorku by mělo být vyřešeno pomocí osy z. Nejprve by se skenovaly okraje měřeného vzorku, podle kterých by se vypočítal náklon roviny a byl potom zaprogramován do osy z.

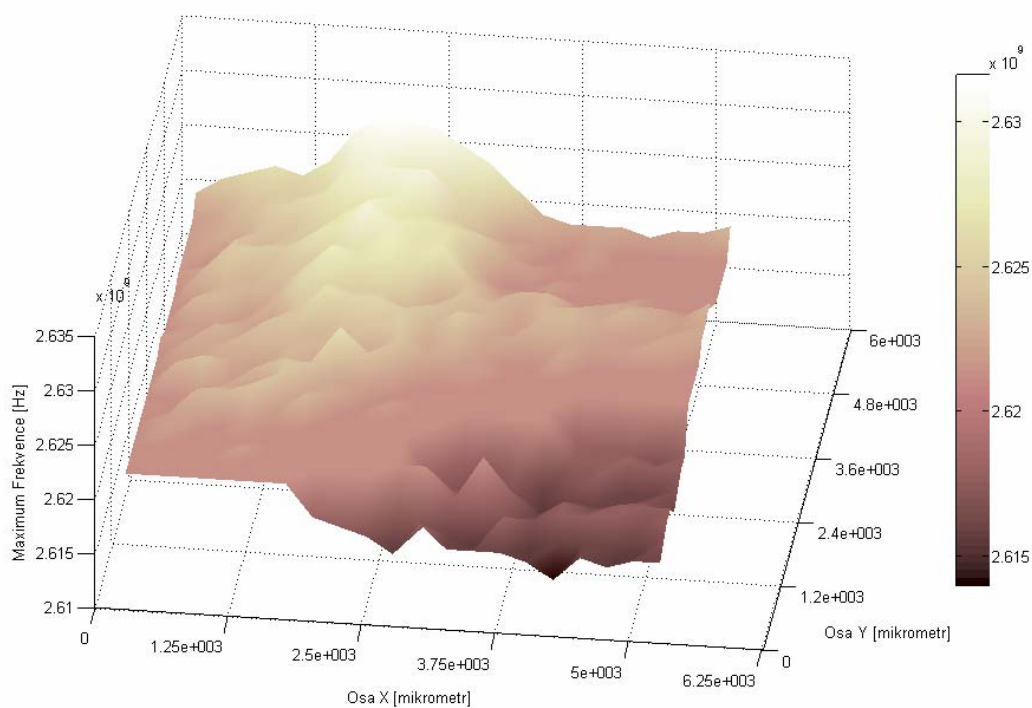


Obr. 34. Zobrazení náklonu snímaného vzorku



Obr. 35. Zobrazení vyhodnocených dat části čísla „5“

Po otočení Obr. 35 o 180° v ose x a zobrazení pomocí interpolačního přechodu barev je zobrazen na obrázku (Obr. 36).



Obr. 36: Pohled na vyhodnocenou část číslice „5“

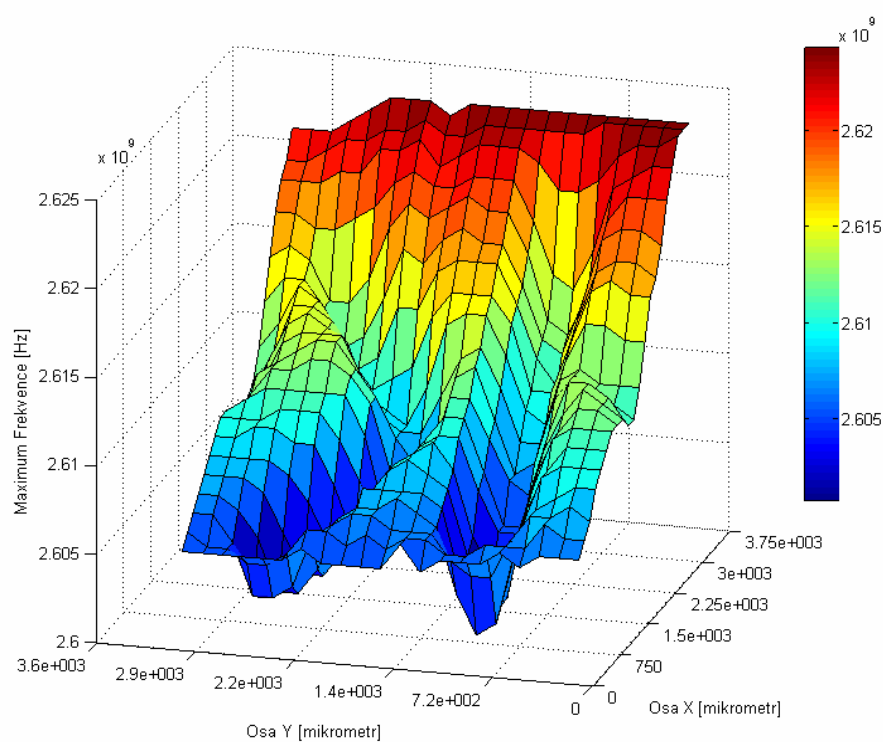
3.2 Druhý snímaný vzorek „K“, vyhodnocení pomocí maxima frekvence

Jako druhý vzorek pro skenování bylo zvoleno písmeno „K“, jenž je zobrazeno černým čtverečkem na obrázku (Obr. 32) a detailnější pohled snímaného vzorku je na obrázku (Obr. 37).

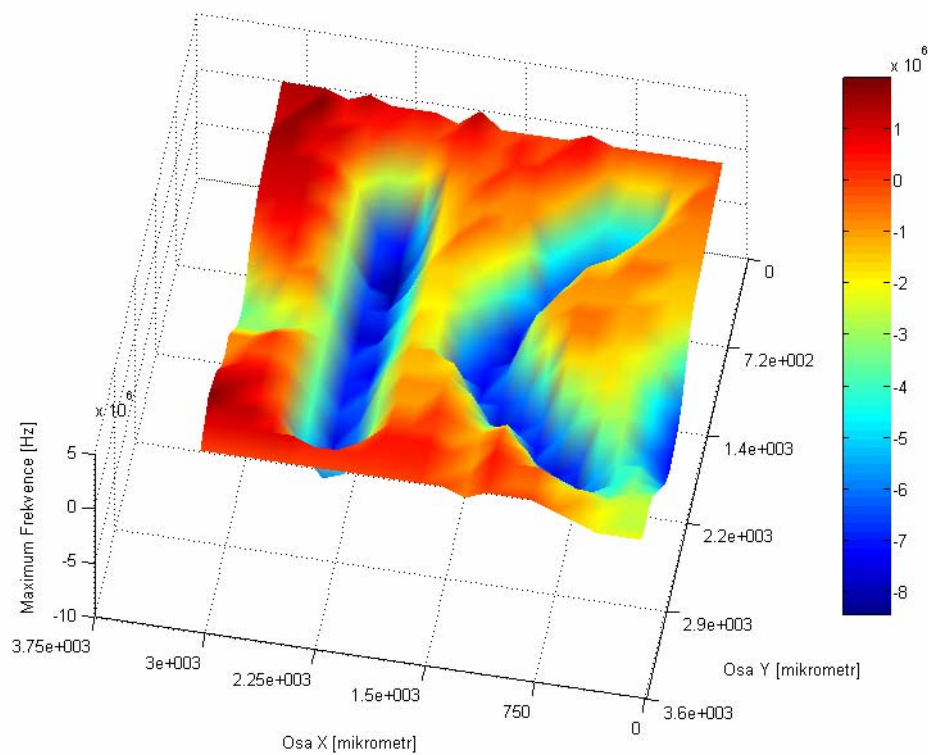


Obr. 37. Detailní pohled na 2. snímaný vzorek „K“ pořízený optickým makrem.

Zobrazení vyhodnocených dat z druhého měření je zobrazeno na obrázku (Obr. 38), kde je velmi vidět náklon skenovaného vzorku „K“. Pro vykreslení vzorku byl použit styl vykreslení „(surf) podle výšky“ a díky naklonění roviny vzorku není moc zřejmé písmeno „K“. Proto byla do programu „graf3D“ přidána položka v menu „Eliminace nakloněné roviny“, která sklopí nakloněnou rovinu. Sklopené „K“ je možno vidět na obrázku (Obr. 39), kde je zcela zřetelné „K“ i s malým kouskem písmene „č“ a malou špičkou „listu“. Po eliminaci roviny je větší povrch mince zobrazen červeně a nastavení roviny do nulové osy z. Osa „z“ se ze 2.086 GHz nastaví na 0 Hz, aby se jednoduše odečítaly jednotlivé nerovnosti povrchu. Napravo v obrázku (Obr. 39) je zobrazen tzv. „ColorBar“, který popisuje jakou číselnou hodnotu mají různé barvy v zobrazeném obrázku. Tyto hodnoty lze také odečíst z osy „z“.

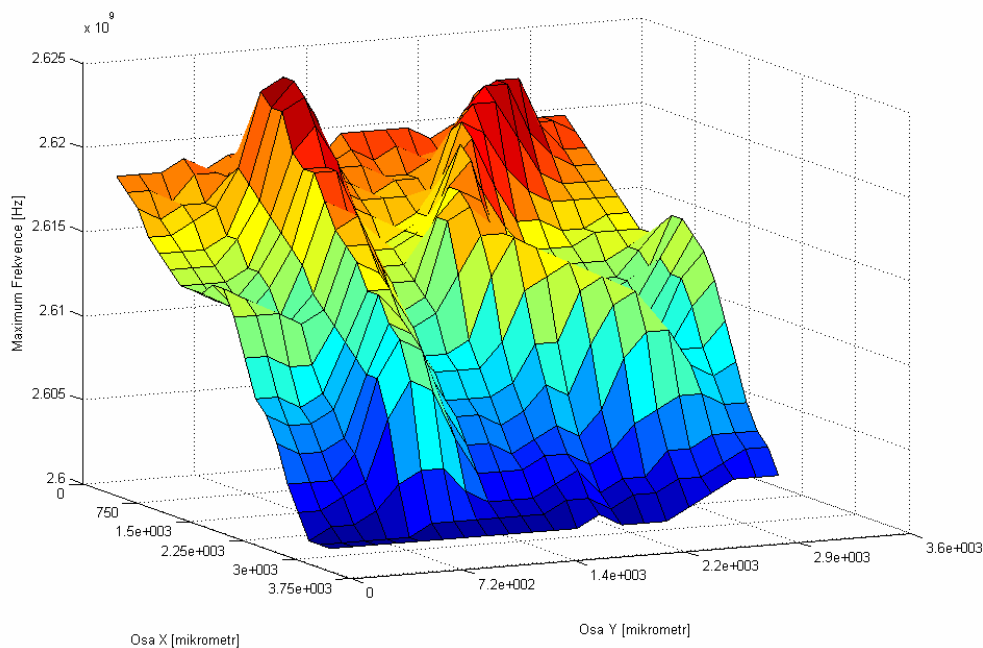


Obr. 38. Zobrazení písmene „K“ bez úpravy dat

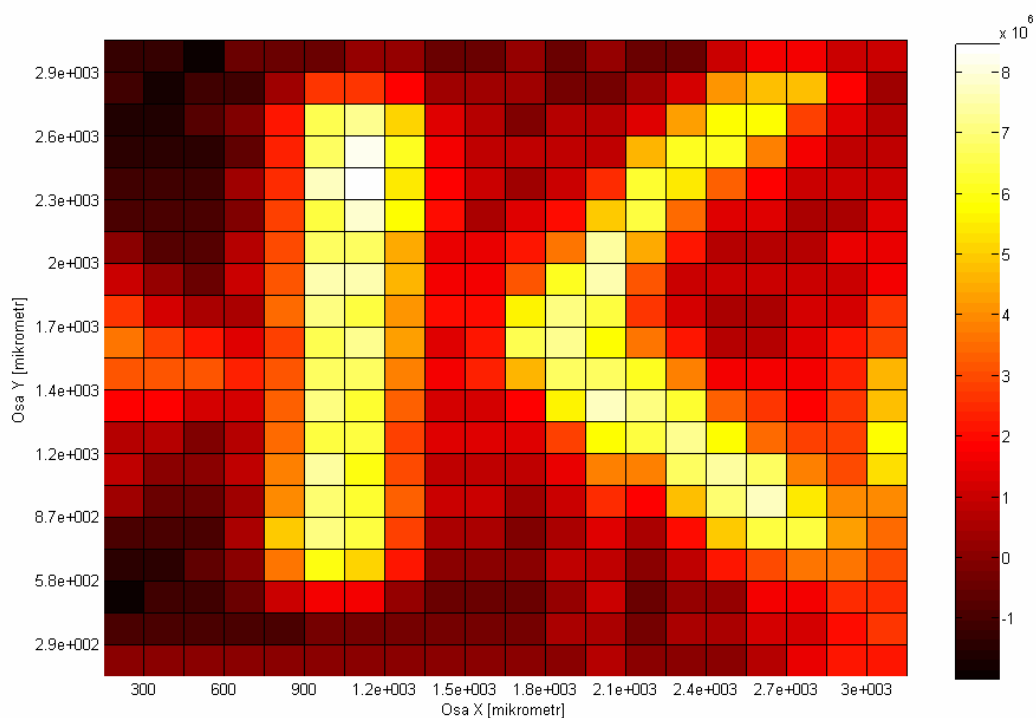


Obr. 39. Eliminace sklopené roviny u měřeného vzorku „K“

Obrázek (Obr. 40) je jenom otočený obrázek (Obr. 38) o 180° podle nakloněné roviny a je na první pohled víc zřetelnější než obrázek (Obr. 38). Opět je tu vidět nakloněná rovina snímaného povrchu „K“. Po sklopení nakloněné roviny je zobrazeno na obrázku (Obr. 41) ve 2D zobrazení, kde snímané písmeno „K“ lze zřetelně přečíst.

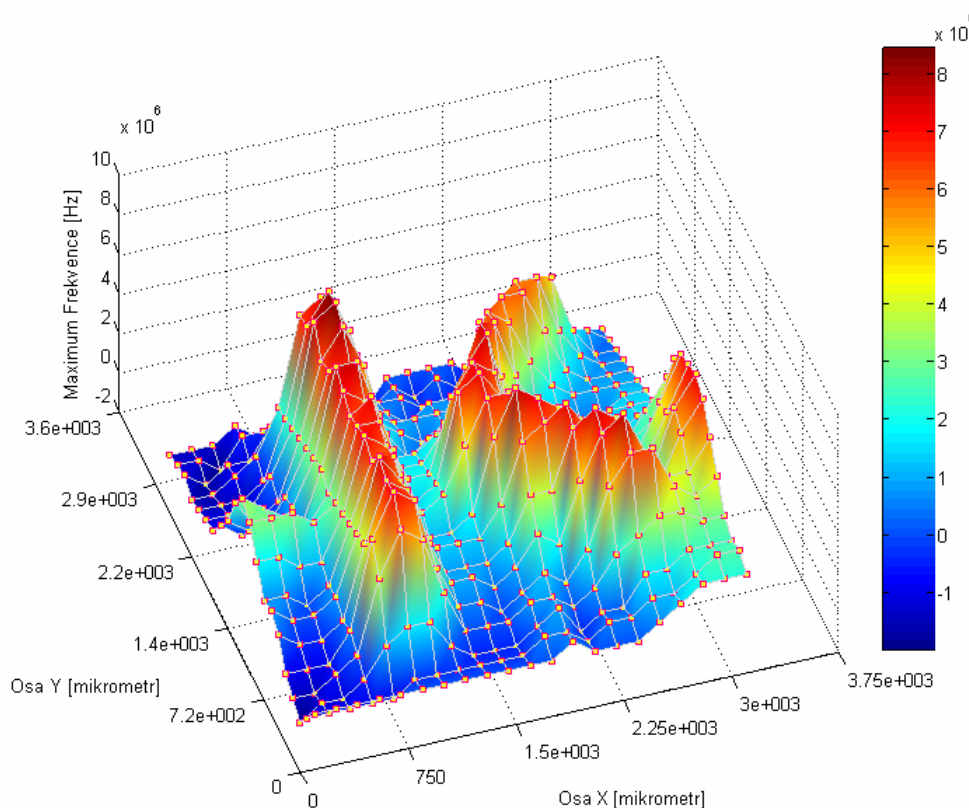


Obr. 40. Obrácený obrázek (Obr. 38) o 180° podle nakloněné roviny



Obr. 41. Po eliminaci roviny písmeno „K“ ve 2D zobrazení

Skenovaný rastr 20x 20 písmene „K“ je zobrazen na obrázku (Obr. 42). Obrázek je po eliminaci nakloněné roviny a styl vykreslení barvy je podle výšky. Jednotlivé rastry měření jsou zobrazeny červeným čtverečkem, který je uvnitř vybarven žlutou barvou.



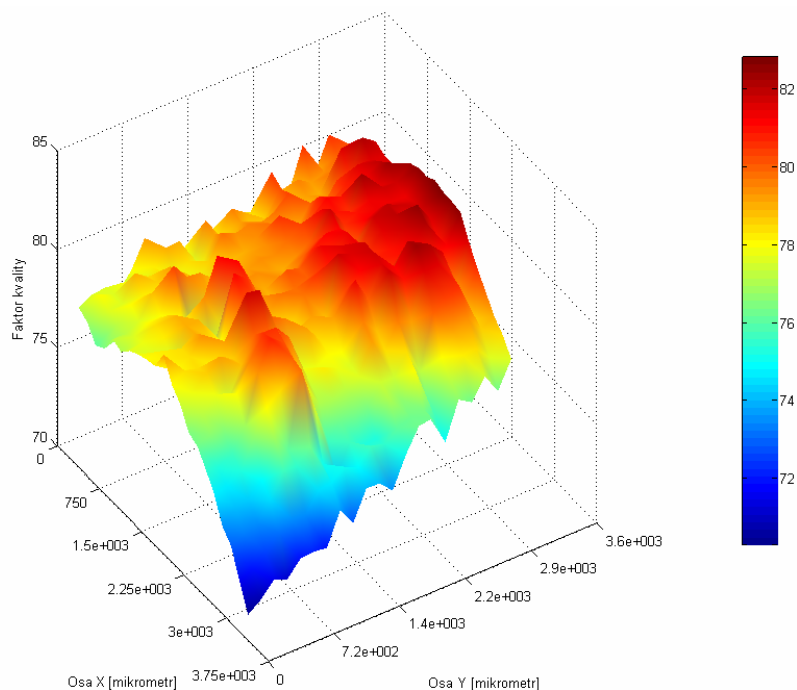
Obr. 42. Písmeno „K“ se zobrazeným skenovaným rastrem

3.3 Vyhodnocení „K“ pomocí faktoru kvality Q

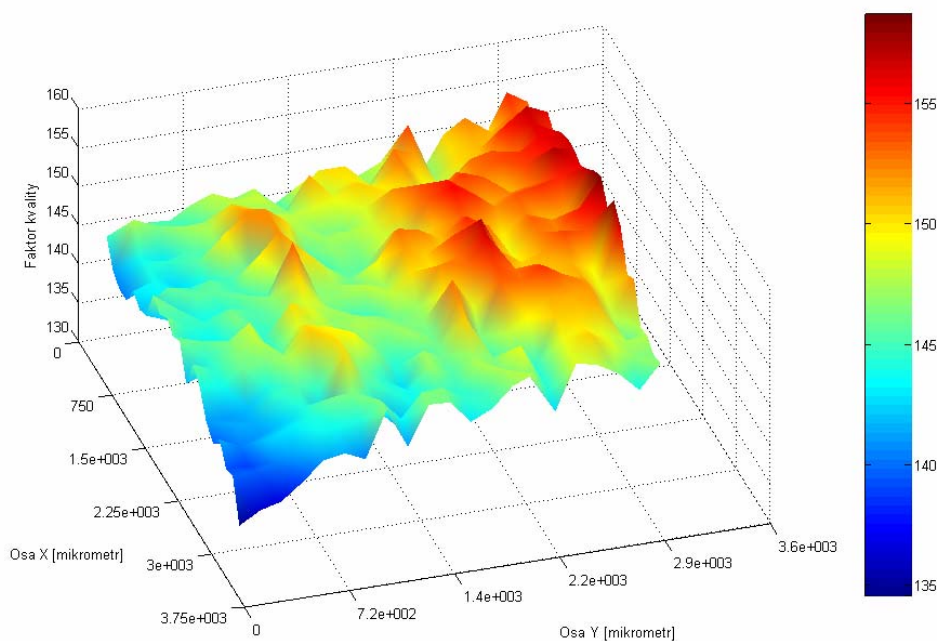
Vyhodnocení písmene „K“ pomocí faktoru kvality je možné vidět na obrázku (Obr. 43) se zesílením 3 dB při vyhodnocování z rezonanční křivky. Z obrázku není patrné, že by se jednalo o písmeno „K“.

Faktor kvality Q je přesnější než maximum frekvence, ale po vizuální stránce je maximum frekvence vidět lépe, protože faktor kvality Q je velmi citlivý na dielektrikum mezi hrotem jehly a snímaným materiálem. Při našem měření byl vzorek nakloněný a proto, jak je patrné z obrázku (Obr. 34), nebyla splněna podmínka pro faktor kvality Q. Nakloněná plocha zaváděla velký šum, který se projevil i ve výsledných vyhodnocených obrázcích. Pro tento důkaz byl zobrazen obrázek (Obr. 44). Pro vyhodnocování faktoru kvality se použilo zesílení 1dB z rezonanční křivky, které se přibližuje k vyhodnocení

pomocí maxima frekvence. Po srovnání obrázků (Obr. 40 a Obr. 44) je vidět, že šum z náklonu roviny se projevil pouze do obrázku (Obr. 44), který byl vyhodnocen pomocí metody faktoru kvality. Pro kvalitnější vyobrazení obrázku pomocí metody faktoru kvality je zapotřebí posuv z, který by eliminoval náклон roviny.



Obr. 43. Zobrazené „K“ pomocí faktoru kvality se zesílením 3 dB při vyhodnocování



Obr. 44. Zobrazené „K“ pomocí faktoru kvality se zesílením 1 dB při vyhodnocování

3.4 Měření čísla „4“ na letopočtu mince

Pro další měření jsme si zvolili číslo „4“ z letopočtu mince s menším rastrem 40 x 40 o rozměru 1,5 mm x 1,5 mm. Celá mince je zobrazena na obrázku (Obr. 45). Detailnější pohled na číslici „4“ je na obrázku (Obr. 46).

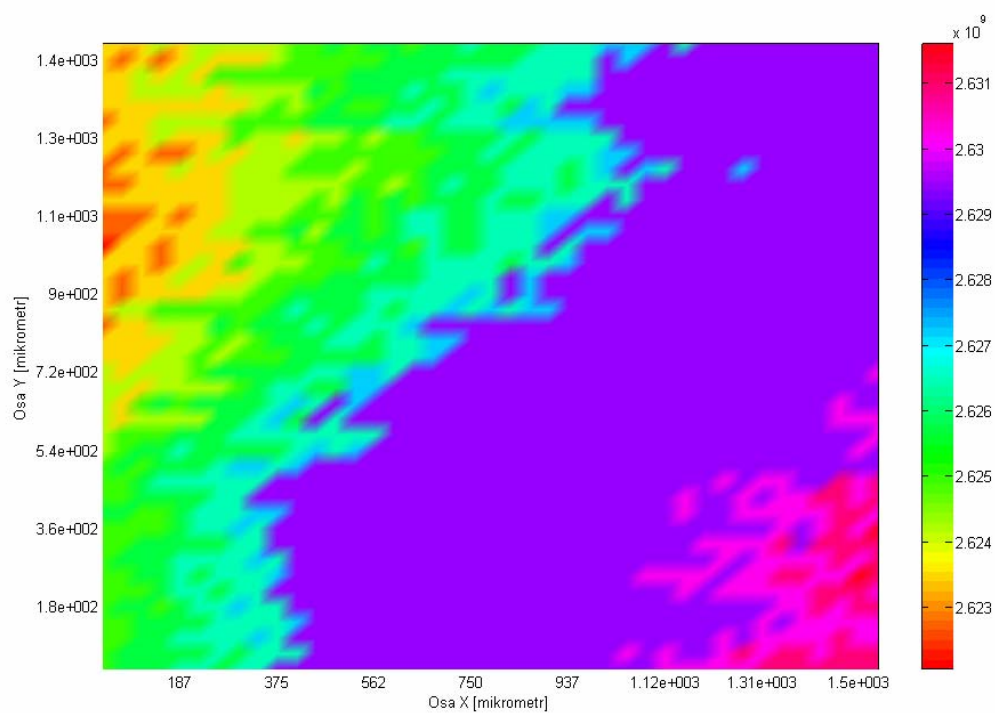


Obr. 45. Zadní strana mince

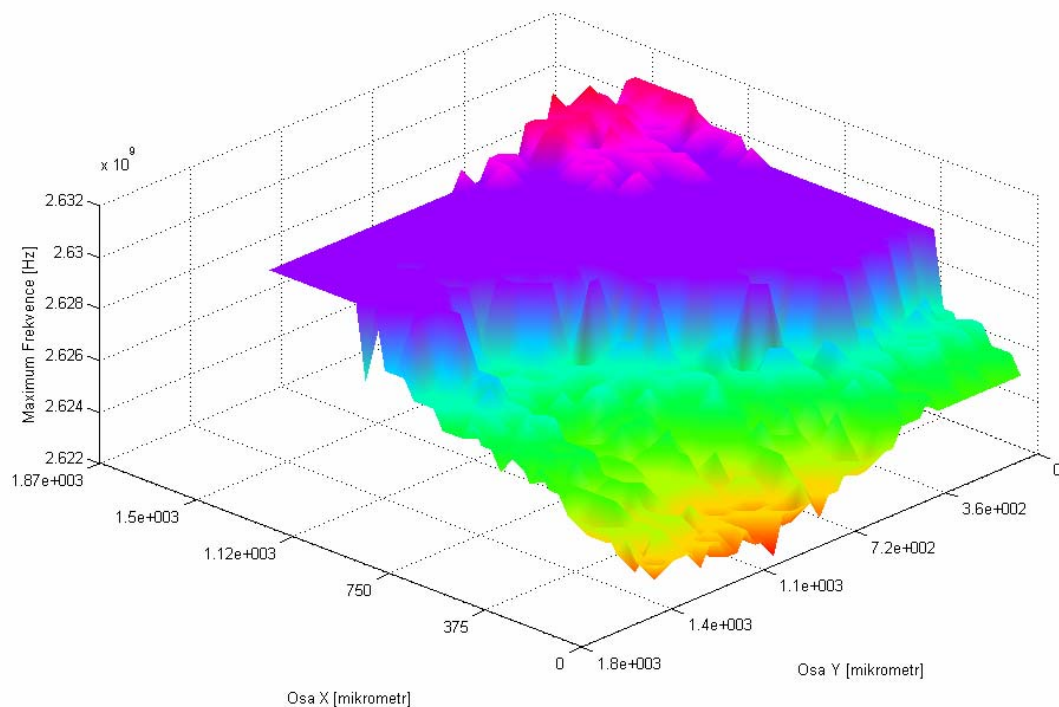


Obr. 46. Detailnější pohled na letopočet mince

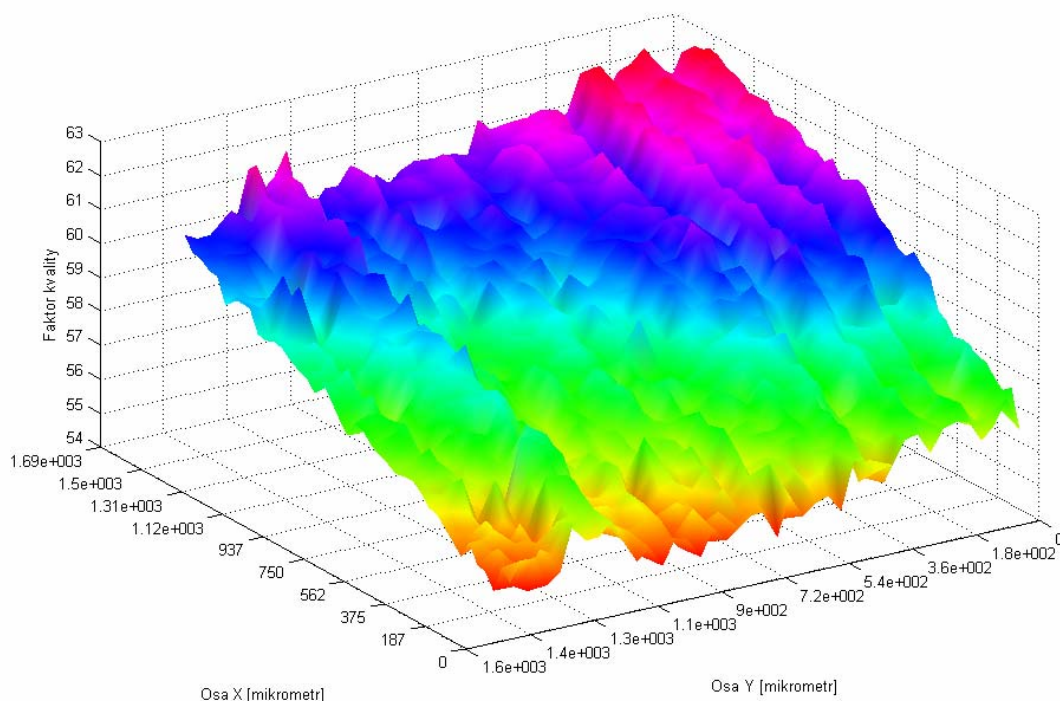
Po vyhodnocení dat jsme zjistili, že námi snímaná plocha neodpovídá číslici „4“. Je to zřejmé z vyhodnocených obrázků pomocí metody maxima frekvence, jenž jsou zobrazeny na obrázcích (Obr. 47 ve 2D zobrazení a Obr. 48 ve 3D zobrazení). Tato chyba byla způsobena umístěním hrotu nad skenovaný povrch vzorku. Mezi rezonátorem a skenovanou mincí je mezera okolo 0,5 cm a rezonátor má mnohonásobně větší průměr než měřený vzorek a proto jsme přesně okem neviděli, kde se hrot nalézá nad skenovaným objektem. Této chybě se dá předejít s užitím zrcátka pro zobrazení hrotu nad mincí, který by se při ustalování hrotu vkládal do dutiny rezonátoru. Náklon roviny při tak malém rastru 1,5 mm x 1,5 mm je velmi malý a opět při zobrazení pomocí faktoru kvality vidíme malý náklon roviny, který je způsoben dielektrikem mezi hrotem a měřeným vzorkem. Fialová plocha by měla být část číslice „4“.



Obr. 47. 2D zobrazení číslice „4“



Obr. 48. Vyhodnocená data z naměřené číslice „4“



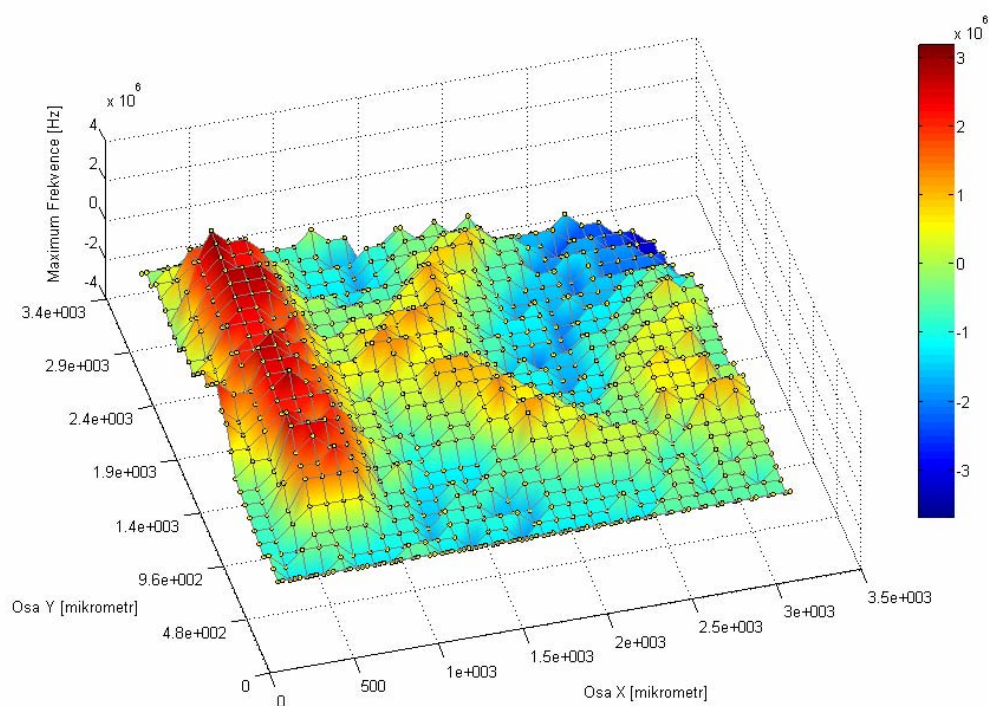
Obr. 49. Číslice „4“ zobrazená pomocí metody faktoru kvality Q s útlumem 3Db

3.5 Snímané „K“ s rastrem 31x31

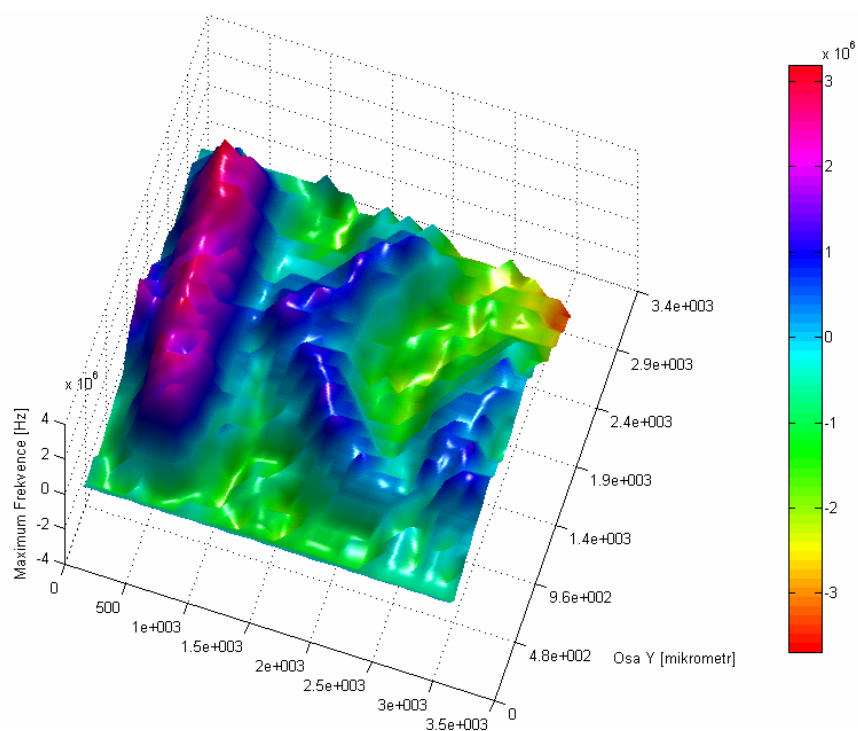
Posledním snímaným vzorkem bylo opět písmeno „K“ s větším rastrem 30 x 30 s rozměrem 3 mm x 3 mm. Snímaný detail měřeného vzorku je zobrazen na obrázku (Obr. 50). Zobrazení obrázků (Obr. 51 a Obr. 52) je po eliminaci nakloněné roviny a otočení obrázku o 180°. Po porovnání obrázků (Obr. 42 s Obr. 51) je vidět, že obrázek s větším rastrem zobrazuje i nerovnosti povrchu, které jsou na minci.



Obr. 50. Detail snímaného „K“ s rastrem 30x30



Obr. 51. Písmeno „K“ s rastrem 30 x 30 po úpravě nakloněné roviny

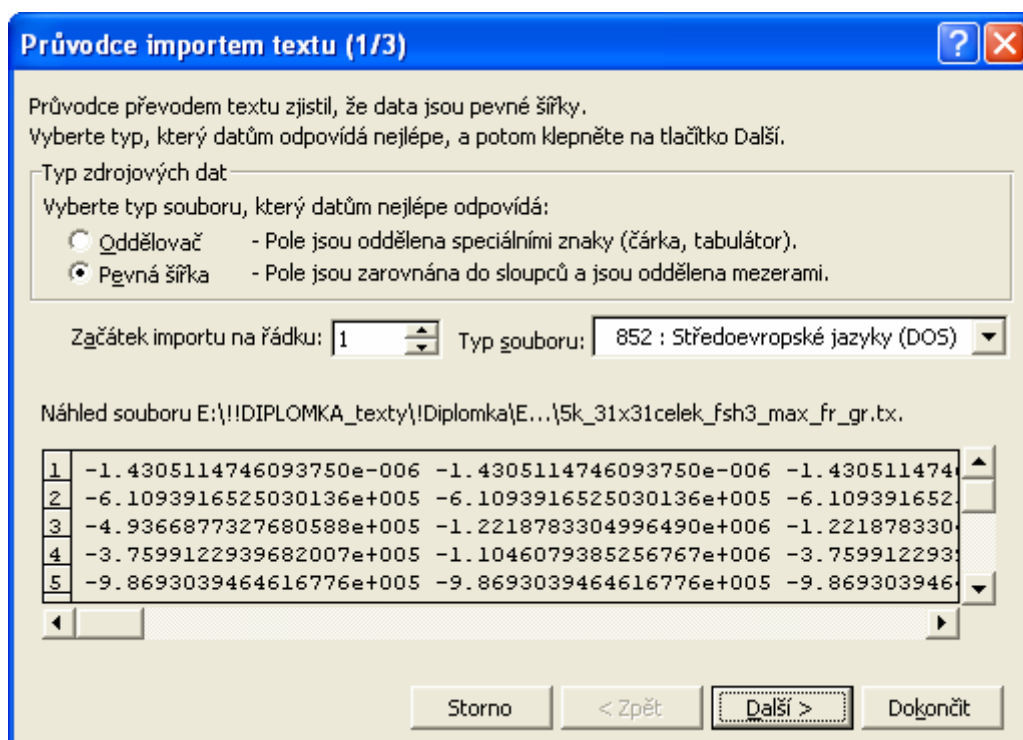


Obr. 52. Písmeno „K“ bez rastru po úpravě nakloněné roviny s osvětlením

3.6 Import vyhodnocených dat do programu Microsoft Excel

Pokud v programu „FSH3m“ nebo „Graf3D“ uložíme soubor s příponou „.tx“, můžeme jednotlivý soubor zobrazit i v jiném programu. Pro zobrazení naměřených dat jsme zvolili nejvíce používaný a dostupný program „Microsoft Excel“. Import dat se provádí následujícím způsobem:

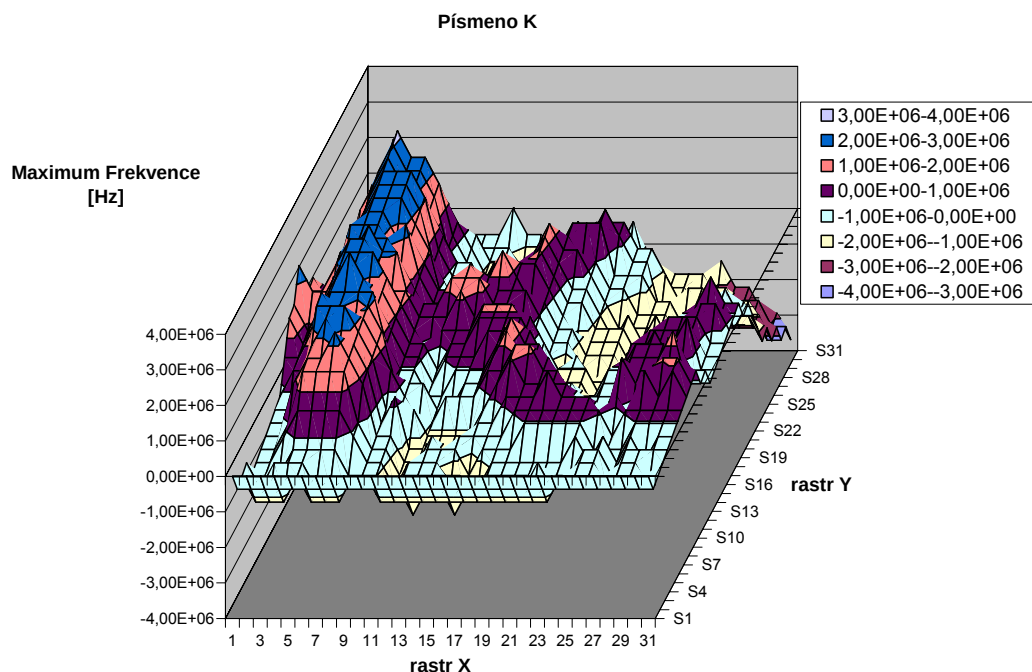
- Načteme program Microsoft Excel
- Otevřeme námi zvolený soubor s příponou „.tx“
- V okně „Průvodcem importem textu“ nastavíme parametry podle obrázku (Obr. 53)



Obr. 53. Import dat v programu Microsoft Excel

- Klepneme 2-krát na tlačítko další, kde si zvolíme oddělovač desetinných míst „.“
- Označíme všechna data a zvolíme typ grafu „povrchový graf“
- Výsledný graf v Microsoft Excel je zobrazen na obrázku (Obr. 54), který obsahuje přesná data z obrázků (Obr. 51 a Obr. 52).

- Import dat z dolního rolovacího okna „Vyhodnocená data ze souborů“ v programu „FSH3m“ se používá při importu v programu „Microsoft Excel“ jako oddělovač dat speciální znak „|“, který odfiltruje čísla od textu.



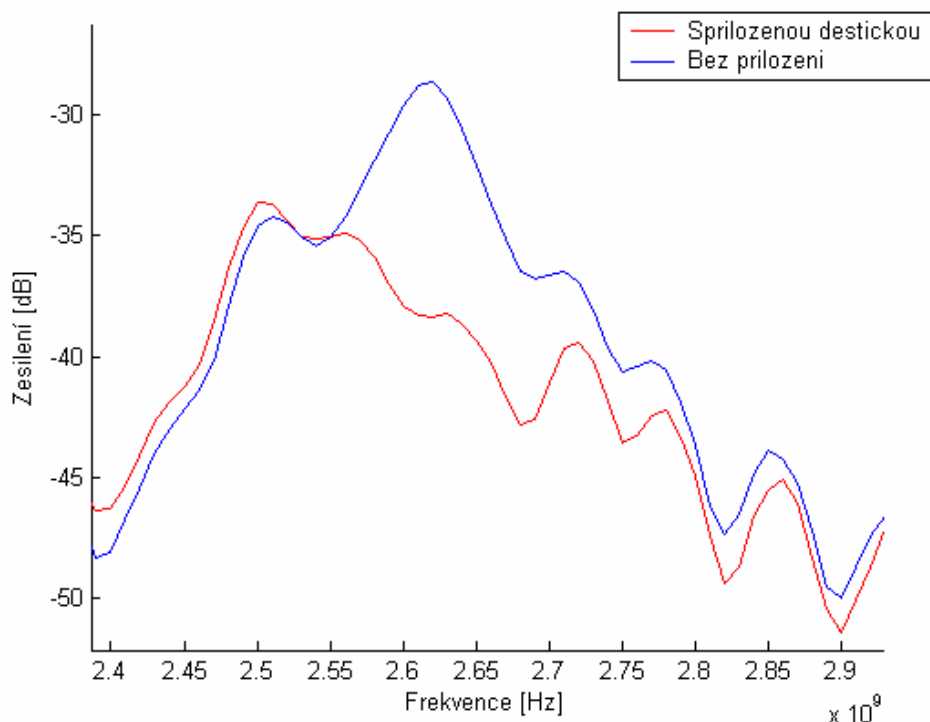
Obr. 54. Zobrazení importovaných dat v Microsoft Excel

3.7 Zjištění citlivosti mikroskopu

Pro zjištění citlivosti mikroskopu jsme si změřili pomocí mikrometru výšku „K“ od povrchu mince, která činí $100\mu\text{m}$. Z obrázku, na němž je zobrazeno „K“ s rastrem 30×30 , jsem vyčetl rozsah frekvence od povrchu mince k výstupku „K“, který je $3,5 \cdot 10^6 \text{ Hz}$.

Citlivost mikrovlnného mikroskopu je $35000 \text{ Hz}/\mu\text{m}$.

Pro zjištění do jaké vzdálenosti působí elektrické pole na hrotu jehly byl proveden pokus těsně přiloženou měděnou destičkou u hrotu a bez destičky. Jednotlivé průběhy jsou zobrazeny na obrázku (Obr. 55). Frekvence maximálního zesílení je u přiložené destičky $2,5 \cdot 10^9 \text{ Hz}$ a bez přiložení destičky jsme naměřili frekvenci maximálního zesílení na $2,62 \cdot 10^9 \text{ Hz}$. Pomocí citlivosti mikrovlnného koaxiálního rezonátoru jsme spočetli, že elektrické pole hrotu je citlivé maximálně do vzdálenosti $3,43 \text{ mm}$.

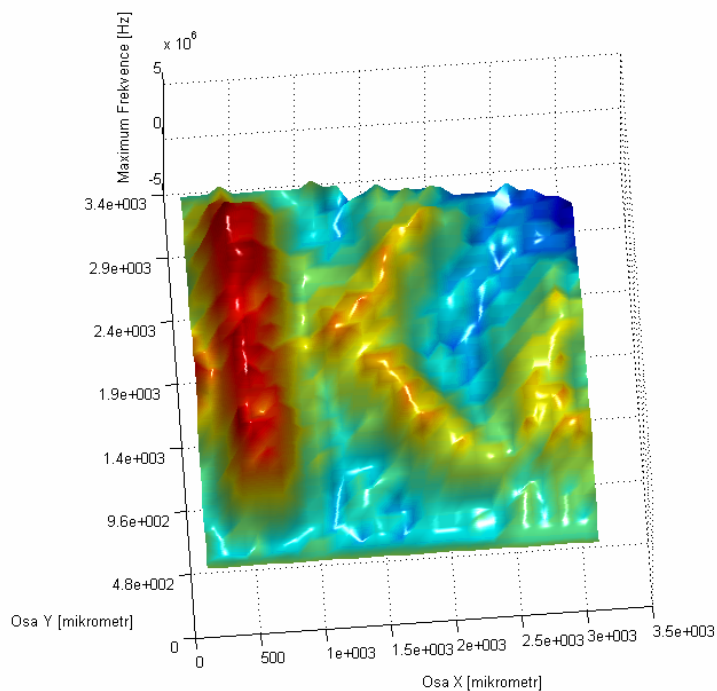


Obr. 55. Citlivost koaxiálního mikrovlnného rezonátoru

- Spektrálního analyzátoru FSH3 má frekvenční čítač 1 Hz. Při posouzení s citlivosti mikroskopu 35000 Hz/ μm vyplívá, že nejmenší dosažené změny povrchu mikrovlnného koaxiálního mikroskopu je 35 nm za určitých předpokladů:
- Mikrovlnný koaxiální rezonátor bude zcela odrušen od okolních rušivých vlivů.
- Eliminace náklonu snímaného vzorku pomocí mikroposuvu v ose z.
- Postrříbření vnitřní dutiny rezonátoru pro lepší vodivost.
- Špička hrotu o velikosti atomu.

Zhodnocení

Zhodnocení naměřených dat je podrobně popsáno v kapitolách praktické části. Vytvořeným programem „Graf3D“ lze docílit nastavení, které jsou popsány v kapitole 2.5. Je možné nastavit parametry jako jsou: osvětlení, průhlednost, aj. (Obr. 56), které jsou standardní funkcí výchozího okna (figure) v MATLABu.



Obr. 56. Skenované „K“ s rastrem 30x30 s osvětlením

Doporučení pro eliminaci přetrvávajících nedostatků: měření a vyhodnocování dat je velmi zdlouhavé – např: u rastru 30x30 bodů činí doba měření a vyhodnocování 8 hodin, proto by hlavním cílem mělo být snížení doby skenování a vyhodnocování. Rychlost vyhodnocování lze zvýšit hardwarovou konfigurací počítače. Pro zkrácení doby skenování je nutno vytvořit program, jež by programově řídil posuvy a zároveň automaticky ukládal rezonanční křivku z přístroje FSH3.

ZÁVĚR

Po sestrojení mikrovlnného koaxiálního rezonátoru a následném naměření dat byly výsledky vyhodnoceny v programu „FSH3m“, který byl navrhnut a naprogramován v programovém prostředí GUI, jenž je součástí MATLABu verze 6.5. V průběhu vyhodnocování dat byly veškeré kritické chyby programu odstraněny. Hlavní důraz při programování byl kladen na jednoduchost obsluhy programu. Program poskytuje jednoduchost v ovládání, ale při tom nabízí širokou škálu možností pro volbu vizuální podoby rezonančních křivek.

Vyhodnocená data lze uložit do jednotlivých souborů pro další zpracování v jiných programech jako např. Microsoft Excel nebo právě mnou vytvořeným programem „Graf3D“. Program „Graf3D“ je opět programovaný v programovém prostředí GUI, jenž je součástí MATLABu verze 6.5. Tento program disponuje velikou škálou nastavení zobrazeného obrázku. Je možno si navolit od palety zobrazení, přes druhy vykreslení, zobrazení skenovaných bodů až po přepočítání os x a y na skutečný rozměr skenovaného vzorku.

V programu jsou k dispozici funkce jako je eliminace náklonu roviny snímaného vzorku, přetočení obrázku podle zvažení uživatele a mnoho dalších funkcí jako např. osvětlení obrázku, tisk, exportování obrázku do jiných programů, uložení dat pro další manipulaci s nimi.

Příklady pro možné aplikace zkonstruovaného mikrovlnného koaxiálního rezonátoru: skenování struktury povrchu materiálu, vyhodnocování drsnosti povrchu a zobrazení magnetického pole.

Byly naměřeny celkem čtyři vzorky na částech mince pět korun českých. Z počátku byly měřeny velké objekty s malým rastrem, postupně se měřily menší objekty se stejným rastrem, poté o něco menší objekty s ještě menším rastrem. U objektu s malým rastrem jsme se zaměřili na část zaoblení mince, u kterého jsme došli k závěru pomocí vyhodnocených dat maxima frekvence a faktoru kvality. Při snímání se vyskytl náklon snímaného vzorku, jenž dodával k datům šum. Pro eliminaci náklonu je zapotřebí, aby k dvou osám x a y byla dodána osa z , která by omezovala náklon roviny snímaného vzorku.

U druhého snímaného vzorku bylo snímáno písmeno „K“ na minci pět korun českých, na kterém se zkoumal vliv faktoru kvality a maxima frekvence. Z uvedených vyhodnocených obrázků je patrné, že faktor kvality je velmi citlivý na dielektrikum mezi

snímajícím hrotem jehly a snímaným vzorkem. Náklon roviny vzorku způsoboval šum, který se ve faktoru kvality projevil tím způsobem, že u vyhodnoceného obrázku jsou data zkreslena. Proto méně přesné vyhodnocení pomocí maxima frekvence má za následek lepší vizuální podobu obrázku, protože není tak citlivý na změnu dielektrika mezi snímajícím hrotem jehly a snímaným vzorkem.

Další měření bylo prováděno s velkým rastrem u číslice „4“ z letopočtu mince pět korun českých, ze kterého vyplynulo, že jsme zcela minuly snímaný vzorek. Došlo ke špatnému umístění hrotu nad přesně skenovanou oblast. Z tohoto měření vyplynulo, že je zapotřebí lepší vizuální kontrolu přijmout některá opatření jako např: umístění zrcátka nebo nejprve vyhodnotit větší část skenovaného vzorku a poté hrot umístit podle vyhodnocených dat do námi přesně zvolené pozice.

Jako poslední, čtvrté, měření bylo opět písmeno „K“ s větším rastrem. Pomocí tohoto měření byla zjištěna citlivost koaxiálního mikrovlnného rezonátoru, která je $35000 \text{ Hz}/\mu\text{m}$ do maximální vzdálenosti $3,43 \text{ mm}$. Největší možné dosažení změn povrchu u koaxiálního mikrovlnného mikroskopu je 35 nm za předpokladu, že budou zpřesněna měření.

Mým návrhem pro další zlepšení je zkrácení doby měření vzorku a to vytvořením programu, který by zároveň řídil mikroposuvy v ose x,y,z a ukládal rezonanční křivku ze spektrálního analyzátoru FSH3 na disk do souboru. Uložená data by byla následovně zpracována v programu FSH3m.

LITERATURA

- [1] Břeň, D., Kulhánek, P.: *Pikoškály aneb jak uvidět atom* [online]. [cit. 2004-7-5], Dostupný z WWW: <www.aldebaran.cz/bulletin/2004_27_pic.html>
- [2] Dumé, B.: *Microscopy moves to the picoscale* [online]. [cit. 6-2004], Dostupný z WWW: <<http://physicsweb.org/articles/news/8/6/6>>
- [3] Mannhart, J., Kopp, T., Giessibl, F., J.: *Lehrstuhl fuer Experimentalphysik VI* [online]. [04/20/2005], Dostupný z WWW: <http://www.physik.uni-augsburg.de/exp6/index/index_e.pshtml>
- [4] Rezek, B.: *Zviditelňujeme atomy* [online]. [01.06.2005], Dostupný z WWW: <<http://www.fzu.cz/texty/brana/atomy/spm1.php>>
- [5] Šňor, M.: *Řádkovací tunelový mikroskop* [online]. [2000-02-13], Dostupný z WWW: <<http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/node96.html>>
- [6] *Mikroskopie skenující sondou*, Dostupný z WWW: <http://atmilab.upol.cz/spm.html>
- [7] Kim, J., Kim, M., S., Lee, J., Cha, D., Friedman, B.: *Development of nearfield scanning microwave microscope using a tunable resonance cavity for high resolution*, Measurement science and Technology 14 (2003), 7-12
- [8] Imtiaz, A., Anlage, S., M.: *A novel STM-assisted microwave microscopy and its applications in characterization of functional materials libraries*, Measurement science and Technology 16 (2005), 248-260
- [9] Staelin, D., H., Morgenthaler, A., W., Kong, J., A.: *Electromagnetic Waves*, Prentice Hall 1994
- [10] Dietmeirer, U.: *Vzorce pro elektroniku*, BEN – Technická literatura, Praha (2002), 5. dotisk 1. českého vydání, ISBN 80-86056-53-8
- [11] *Řešení elektrických obvodů*, Dostupný z WWW: <<http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/sbirka/TEORIE/rezonance.html>>
- [12] *Koaxiální vlnovod*, Dostupný z WWW: <http://www.drpfmfmh.uniba.sk/Mikrovlny/kap05.pdf>

- [13] R&S SM300: *Operating Manual SM300*, Order No. 1147.1498.03, Germany (6th edition 03/2005), Dostupný z WWW: <<http://www.rohde-schwarz.com/Homepage>>
- [14] R&S FS300: *Operating Manual FS300*, Order No. 1147.0991.03, Germany (8th edition 09/2004), Dostupný z WWW: <<http://www.rohde-schwarz.com/Homepage>>
- [15] R&S FSH3: *Uživatelský manuál FSH3*. Praha, 2004.
- [16] Náповěda: MATLAB, Version 6.5.18913a Relase 13, June 18 2002.
- [17] Heinz, R.: *Návrh detekčního uzlu pro mikrovlnný mikroskop*, Diplomová práce, FT Zlín, 2005.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AM	Amplitudová modulace signálu
B	celková vodivost
B_C	kapacitní jalová vodivost
B_L	induktivní jalová vodivost
$\Delta f, BW$	Šířka pásma
f_0	Maximum frekvence
FM	Frekvenční modulace signálu
I	Proud v obvodu
I_C	Proud protékající kondenzátorem
I_{RL}	Proud protékající R a L
φ	Fázový posun
φ_0	Fázový posun mezi U_L a U_C
PM	Pulsní modulace signálu
Q	Faktor kvality, činitel jakosti
R	Rezistence
U_C	Napětí na kondenzátoru
U_L	Napětí na cívce
U_R	Napětí na odporu
ω	úhlová frekvence
ω_r	Rezonační frekvence
X	Celková reaktance
X_C	Reaktance na kondenzátoru
X_L	Reaktance na cívce
Y	Admitance

Z	Celková impedance
Z_{RL}	Celková impedance RL

indexy

p paralelní

s sériová

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Princip řádkovacího tunelového mikroskopu [1]	8
Obr. 2. Skenovací hrot řádkovacího tunelového mikroskopu [4].....	8
Obr. 3. Povrch železa s nečistotami chrómu (dvě vyvýšeniny). NASA 2004 [1]	10
Obr. 4. Snímací hrot AFM mikroskopu [4]	11
Obr. 5. Princip AFM mikroskopu [1]	11
Obr. 6. První AFM snímek povrchu křemíku s rozlišením na atomární úrovni. Velikost oblasti $18 \times 18 \text{ nm}^2$. Barvy označují výšku nad povrchem. Nahoře je patrná řádka atomů. Science 267, 68 (1995) [1].....	12
Obr. 7. FM-AFM snímek s rozlišením 77 pm. Viditelné jsou struktury uvnitř atomů wolframu. Celá oblast zaujímá plochu $500 \times 500 \text{ pm}^2$. Napravo je pro srovnání tatáž oblast skenovaná mikroskopem STM [3]	12
Obr. 8. Rezonátor sestavený podle [7]	14
Obr. 9. Pásmová zádrž nebo propustnost.....	14
Obr. 10. Sériový RLC obvod střídavého proudu	15
Obr. 11. Fázorový diagram sériového RLC obvodu střídavého proudu	16
Obr. 12. Sériové zapojení RLC.....	18
Obr. 13. Paralelní zapojení v obvodu střídavého proudu	18
Obr. 14. Fázorový diagram pro paralelní zapojení kondenzátoru a cívky.....	19
Obr. 15. Paralelní obvod s RLC prvky	21
Obr. 16. Průběh rezonanční frekvence námi použitým rezonátorem.....	22
Obr. 17. Softwarové vybavení signálového generátoru SM300	24
Obr. 18. Čelní panel signálového generátoru SM300.....	24
Obr. 19. Displej spektrálního generátoru SM300	26
Obr. 20. Programové vybavení spektrálního analyzátoru FS300	27
Obr. 21. Přední panel spektrálního analyzátoru FS300	28
Obr. 22. Obrazovka spektrálního analyzátoru FS300.....	29
Obr. 23. Spektrální analyzátor FSH3.....	30
Obr. 24. Okno „Dataset Kontrol“ pro přenos naměřených dat do PC	31
Obr. 25. Okno pro převod souboru do jiného formátu	32
Obr. 26. Pohyb měřeného vzorku pod snímacím hrotem	34
Obr. 27. Programové prostředí „fsh3m“	36
Obr. 28. Kvadratické proložení maxima píku rezonanční frekvence	38
Obr. 29. Uložení vyhodnocených dat do souboru	39
Obr. 30. Grafické rozhraní programu „Graf3D“	43
Obr. 31. Paleta barev.....	46
Obr. 32. Celkový pohled na snímaný vzorek.....	50
Obr. 33. Část snímaného vzorku mince pořízený optickým makrem.....	50
Obr. 34. Zobrazení náklonu snímaného vzorku.....	51
Obr. 35. Zobrazení vyhodnocených dat části čísla „5“	52
Obr. 36. Pohled na vyhodnocenou část písmene „5“	52
Obr. 37. Detailní pohled na 2 snímaný vzorek „K“ pořízený optickým makrem.....	53
Obr. 38. Zobrazení písmene „K“ bez úpravy dat.....	54
Obr. 39. Eliminace sklopené roviny u měřeného vzorku „K“	54
Obr. 40. Obrácený obrázek (Obr. 38) o 180° podle nakloněné roviny.....	55
Obr. 41. Po eliminaci roviny písmeno „K“ ve 2D zobrazení	55
Obr. 42. Písmeno „K“ se zobrazeným skenovaným rastrem.....	56
Obr. 43. Zobrazené „K“ pomocí faktoru kvality se zesílením 3 dB při vyhodnocování.....	57
Obr. 44. Zobrazené „K“ pomocí faktoru kvality se zesílením 1 dB při vyhodnocování.....	57

Obr. 45. Zadní strana mince.....	58
Obr. 46. Detailnější pohled na letopočet mince.....	58
Obr. 47. 2D zobrazení číslice „4“	59
Obr. 48. Vyhodnocená data z naměřené číslice „4“	59
Obr. 49. Číslice „4“ zobrazená pomocí metody faktoru kvality Q s útlumem 3Db	60
Obr. 50. Detail snímaného „K“ s rastrem 30x30	60
Obr. 51. Písmeno „K“ s rastrem 30 x 30 po úpravě nakloněné roviny.....	61
Obr. 52. Písmeno „K“ bez rastru po úpravě nakloněné roviny s osvětlením	61
Obr. 53. Import dat v programu Microsoft Excel	62
Obr. 54. Zobrazení importovaných dat v Microsoft Excel	63
Obr. 55. Citlivost koaxiálního mikrovlnného rezonátoru	64
Obr. 56. Skenované „K“ s rastrem 30x30 s osvětlením.....	65

PŘÍLOHA

Tabulka 1: Převod rastru na skutečné hodnoty

Skenovaný povrch materiálu	Rastr	Osa x			Osa y		
		1 krok	Skutečná hodnota	Celkový rozměr	1 krok	Skutečná hodnota	Celkový rozměr
5	20x20	43150	250μm	5000μm	43150	240,7μm	4814,6μm
K	20x20	25890	150μm	3000μm	41550	144,4μm	2888μm
4	40x40	6472	37,5μm	1500μm	6232	36,1μm	1444,4μm
K	30x30	17260	100μm	3000μm	16620	96,3μm	2888,8μm